

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ
TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra tváření materiálu

Válcování velkých kroužků za tepla
Hot working process for large rings

Student: Denis Piták
Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Miroslav Greger, CSc.

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra tváření materiálu

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Denis Piták**
Studijní program: N2109 Metalurgické inženýrství
Studijní obor: 2109T038 Moderní metalurgické technologie
Téma: **Válcování velkých kroužků za tepla**
Hot working process for large rings

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Rozbor deformace a napětí při válcování kroužků
3. Analýza postupu výroby válcovaných kroužků
4. Vliv postupu výroby kroužků na vznik povrchových a vnitřních vad
5. Experimentální stanovení struktury a vlastností kroužků
6. Diskuse a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KIM, K. J., CHOI, S. S., HWANG, C. Y. et al. Ring-rolling process for manufacturing Ti-6Al-4V plane and profiled. *Advanced Materials Research*, 2007, Vols. 26-28, pp. 429-432.
[2] SHIVPURI, R., ERUC, E. Planning and simulation of the ring rolling process for improved productivity. *Int. J. Mach. Tools Manufacturing*, 1993, Vol. 33, pp. 153-173.
[3] YEOM, J. T., KIM, J. H., PARK, N. K. et al. Ring-rolling design for large-scale ring product of Ti-6Al-4V alloy. *J. Materials Processing Technology*, 2007, Vol. 187-188, pp. 747-751.
[4] BERTI, G., MONTI, M. Design of a flanged ring produced by hot forming using FE analysis. *International Journal of Materials Engineering and Technology*, 2011, No. 7, pp. 1 - 15.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Miroslav Greger, CSc.**

Konzultant diplomové práce: Václav Horáček

Datum zadání: 30.11.2017

Datum odevzdání: 23.04.2018

prof. Ing. Ivo Schindler, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah DP |
| 2. Originál zadání DP | 7. Textová část DP |
| 3. Zásady pro vypracování DP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

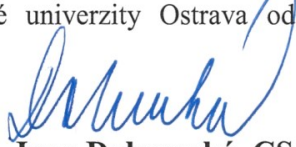
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2017/2018.

Ostrava 13. 11. 2017


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě
2.5.2018

.....
Denis Fiala
podpis (jméno a příjmení studenta)

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří se podíleli na mé diplomové práci. Jmenovitě panu doc. Ing. Miroslavu Gregrovi, CSc. z Katedry tváření materiálu za odborné vedení při zpracování diplomové práce, dále pak panu Václavu Horáčkovi za cenné rady a připomínky, a také Ing. Oldřichovi Cieslarovi za pomoc s překladem odborné literatury.

Abstrakt

Cílem diplomové práce je vliv technologie výroby na strukturu, vlastnosti kroužků a na vznik povrchových a vnitřních vad nízkolegované oceli 42CrMo4. Úvodní část se zabývá rozborem deformace při válcování kroužku a analýzou postupu výroby ve společnosti Brück AM. V další části práce je rozbor a identifikace vad a jejich charakteristika po jednotlivých technologických operacích, které vedou k rozhodujícím poškození. Podnik Brück AM vyrábí ploché a profilované, zejména ložiskové kroužky, které jsou součástí pro využití v různých odvětví průmyslu. Sortiment výrobků je aplikován v leteckém, automobilovém a strojném průmyslu. Při některých procesních podmínkách mohou být někdy nalezeny vady jako je ovalita, prasklina, přeložka nebo porezita za tepla válcovaných kroužků, které jsou vyráběny z ingotu, popř. z PLP které mají makrosegregace. Počet válcoven kroužků stále stoupá po celém světě.

Klíčová slova:

Kroužky, výroba kroužků, struktura, vady a vlastnosti kroužků

Abstract

The objective of this dissertation is influence of production technology on structure ring properties and origin of surface and internal defects of the low-alloyed steel 42CrMo4. Exordium is devoted to analysis of deformation during rolling of rings and analysis of production process in Brück AM. The next one is dedicated to analysis and identification of defects, their characteristic after individual technological operations which lead to the final damage. Brück AM produce flat and profiled ring particularly bearing ones which are employed in various industry branches. Product assortment is applied in aerospace automotive and engineering industry. Defects as out of roundness crack, overlap or porosity can be identified under some process conditions on the hot rolled rings that are produced from ingot or CCB that contain macrosegregations. Number of ring rolling mills goes up constantly in the world.

Keywords:

Rings, ring production, structure, defects, ring properties.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	10
1 Úvod	12
2 Rozbor deformace a napětí při válcování kroužků.....	14
2.1 Hlavní parametry válcování kroužků.....	14
2.1.1 Úběr tloušťky stěny.....	14
2.1.2 Délka pásma deformace	14
2.1.3 Válcovací síla	15
2.1.4 Střední deformační odpor.....	15
2.1.5 Geometrické poměry	17
2.1.6 Záběrový úhel	17
2.1.7 Šíření	18
2.2 Válcované tvary	20
2.3 Materiál kroužků a charakteristika rozměrů	21
2.4 Typy strojů pro válcování kroužků	21
3 Analýza postupu výroby válcovaných kroužků	23
3.1 Technologie válcování hladkých kroužků	23
3.2 Technologie válcování profilových kroužků	26
3.3 Speciální postupy válcování kroužků	28
3.4 Technologický postup výroby kroužků v společnosti AM Brück	30
3.4.1 Výběr materiálů.....	30
3.4.2 Měření vstupního průměru	30
3.4.3 Řezání.....	31
3.4.4 Založení bloků do pecí	32
3.4.5 Ohřev a příhřev	32
3.4.6 Kování	34
3.4.7 Válcování kroužků	34
3.4.8 Měření výkovku	35
3.4.9 Ražení a označování výkovků.....	37
3.4.10 Uložení výkovku po doválcování	37
3.4.11 Výstupní kontrola.....	37
4 Vliv postupu výroby kroužků na vznik povrchových a vnitřních vad	38

5	Experimentální stanovení struktury a vlastností kroužků	41
5.1	Rozbor vady v kroužku vyrobeného z oceli 42CrMo4	41
5.1.1	Zadání a vstupní údaje	41
5.1.2	Výsledky	41
5.1.3	Závěr	44
5.2	Rozbor vady v ingotu pro výrobu kroužků	44
5.2.1	Zadání a vstupní údaje	44
5.2.2	Výsledky	45
5.2.3	Závěr	47
5.3	Metalografický rozbor příčiny porušení válcovaného kroužku	47
5.3.1	Základní a vstupní údaje	47
5.3.2	Výsledky	48
5.3.3	Závěr	56
6	Diskuse a závěr	58
7	Seznam použitých zdrojů	60

Seznam použitých značek a symbolů

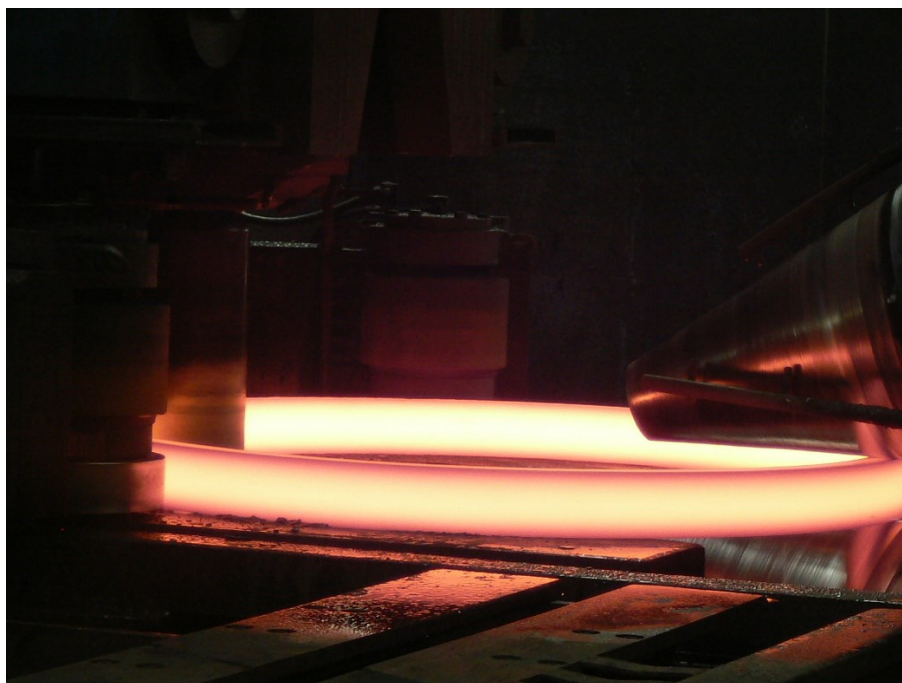
Značka	Název	Jednotka
ΔS	Celkový úběr tloušťky stěny	[mm]
ΔS_i	Vnitřní strana válce	[mm]
ΔS_e	Vnější strana válce	[mm]
l_d	Délka pásma deformace	[mm]
R_i	Poloměr vnitřního válce	[mm]
R_e	Poloměr vnějšího válce	[mm]
F_v	Válcovací síla	[N]
σ_d	Střední deformační odpor	[MPa]
Q_f	Tvářecí faktor	[-]
S	Kontaktní plocha	[m ²]
β	Součinitel stavu napjatosti	[-]
σ_p	Přirozený deformační odpor	[MPa]
q	Nejmenší hlavní napětí	[MPa]
h	Výška kroužků	[mm]
T	Teplota	[°C]
$\dot{\epsilon}$	Deformační rychlost	[s ⁻¹]
D_i	Průměr vnitřního válce	[mm]
D_e	Průměr vnějšího válce	[mm]
f	Koeficient tření mezi válcem a tvářeným materiálem	[-]
α_i	Vnitřní úhel	[°]
α_e	Vnější úhel	[°]
l	Délka kusu	[mm]
m	Hmotnost	[kg]
ρ	Hustota oceli 7850	[kg/m ³]

π	Ludolfovo číslo	[mm]
d	Průměr	[mm]
K	Mez kluzu	[MPa]
P	Mez pevnosti	[MPa]
A	Tažnost	[%]
Z	Zúžení	[MPa]
KV	Tvrdost (dle Vickerse)	[J]

1 Úvod

Válcovací proces kroužků má výhody v krátké době výroby, v úsporách materiálu, úzké tolerance apod. Válcování kroužků nabízí velké možnosti v ložiskovém průmyslu, kde je vyráběno mnoho typu kroužků s mnoha různými velikostmi ve velkých sériích. Protože geometrie většiny ložisek je složitá, návrh procesu může být obtížný [1]. Rozdílná velikost válců vytváří nesouměrné pásmo deformace a z toho vychází několik zvláštností tohoto průběhu. Při válcování profilových kroužků je potřeba tvarovat předkovek na základě technologické operace volného kování, nebo kováním v zápustce [2].

Strojní zařízení pro válcování kroužků je tvořeno před kovacím strojem a válcovačkou s daným manipulačním a ohřívacím zařízením. Válcování na radiálně-axiálním zařízení (obr. 1), je všestranné a náročnější na technologii. Zejména válcování kroužků velké výšky a malé tloušťky a malé výšky a velké tloušťky stěny činí problém [3].



Obr. 1 – Válcování kroužků

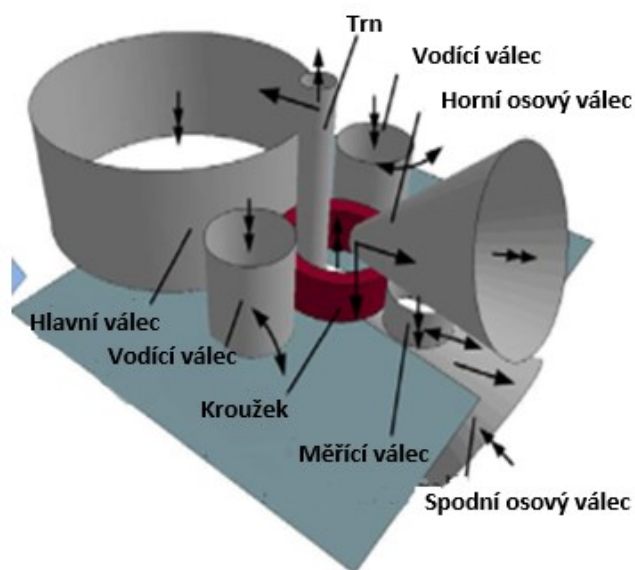
Mezi často žádané výkovky, patří geometricky odlišné prstence a kroužky. Pozornost se věnuje jejich produktivitě a přesnosti při jejich výrobě.

Na snímku 1 se kroužek deformuje dvěma páry válců. Vnitřní válec (mnohokrát označen jako trn), má menší průměr než vnější válec, který má název jako hlavní válec. Vnitřní válec má vždy menší průměr, než je střední průměr otvoru v nejmenším předkovku. Tento proces se značí rozválcování na rozdíl od běžného podélného válcování, kterým se zpracovává většina vyrobené oceli [3, 4].

Materiál jednotlivých dílů válcovací stolice je u axiálního, hlavního válce a válcovacího trnu z nástrojové oceli (dále NO) ČSN 19 663 (Tab. 1). Dále vodící centra a stoly z oceli 42CrMo4 [5].

Tabulka 1 Chemické složení nástrojové oceli 19 663 (hm. %)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,55	0,25	0,75	1,00	0,45	0,15



Obr. 2 – Schéma radiálně axiálního stroje (RAW) [6]

Např. firma Brüch válcuje kroužky o vnějším průměru 400 – 4 000 mm, výška kroužku se pohybuje kolem 30–630 mm a maximální hmotnost kroužku je 7 000 kg. V ČR převládají hladké kroužky a obruče, ale ve světě se však válcuje i značné množství nejrozličnějších profilovaných kroužků [5].

2 Rozbor deformace a napětí při válcování kroužků

Při deformaci dochází ke změně tvaru tělesa vlivem působení síly. Poloha atomů se v tělese mění účinkem této síly. V situaci, kdy se těleso vrátí do počátečního tvaru po působení síly, mluvíme o pružné (elastické) deformaci. V případě plastické deformace dojde k nevratným změnám, a tudíž také k nevratným změnám v poloze atomů v tělese.

Napětí lze definovat jako sílu působící na plochu [7].

2.1 Hlavní parametry válcování kroužků

Válce pro radiální úběr nemají totožný průměr (vnitřní válec je pokaždé menší), což vyžaduje provést úpravy vztahů, známých z teorie podélného válcování.

2.1.1 Úběr tloušťky stěny

Následkem rozdílných průměrů válců jsou úběry z vnitřní a vnější stran odlišné, jak je zřejmé na obrázku 3. Přitom pro celkový úběr platí [3, 8]:

$$\Delta S = \Delta S_i + \Delta S_e \quad (2.1)$$

Kde

ΔS – celkový úběr tloušťky stěny,

ΔS_i – vnitřní strana válce,

ΔS_e – vnější strana válce.

Vstupní tloušťka kroužků lze označit jako s_0 a vstupní výška kroužku h_0 rozměry po válcování jsou s_1 a h_1 (Při podélném válcování se tloušťka označuje h a šířka jako b).

2.1.2 Délka pásma deformace

Válcování je tvářecí operace, při němž se polotovar vtahuje mezi otáčející válce do válcovací mezery a zde jej stlačují. Tento průběh neprobíhá v celém objemu, ale pouze v omezené oblasti – v pásmu deformace. Délka pásma deformace je definována střední šířkou a délkou. Rovněž pro vnitřní a vnější válec je odlišná délka pásma deformace [3, 8]:

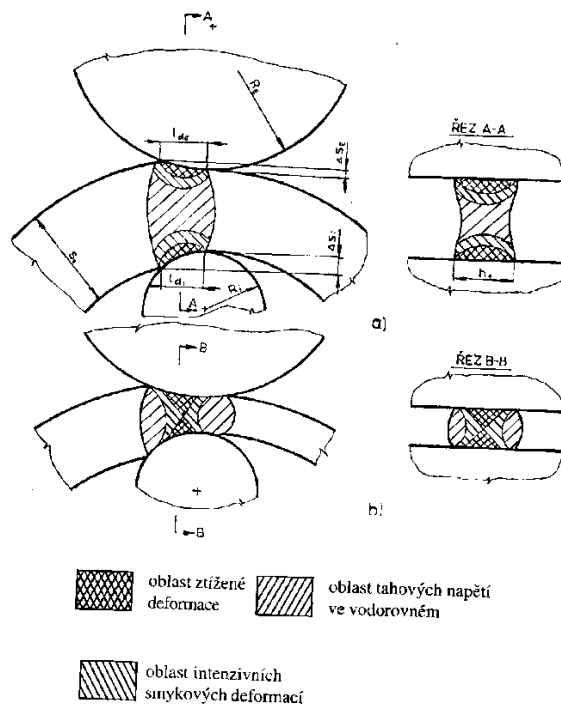
$$l_{de} = \sqrt{2 \cdot R_i \cdot \Delta_i} \quad l_{di} = \sqrt{2 \cdot R_e \cdot \Delta_e} \quad (2.2)$$

Kde

R_i – poloměr vnitřního válce,

R_e – poloměr vnějšího válce,

l_d – délka pásma deformace.



Obr. 3 – Schéma pásma deformace při válcování kroužků na válcích rozdílného průměru [9]

2.1.3 Válcovací síla

Asymetrie v oblasti pásma deformace ovlivňuje konečnou geometrii vyválcovaného kroužku, a to do velké míry negativně. Válcovací síla je dána obecným vzorcem [10, 11]:

$$F_v = \sigma_d \cdot Q_f \cdot S \quad (2.3)$$

Kde

σ_d – střední deformační odpor,

Q_f – tvářecí faktor,

S – kontaktní plocha.

2.1.4 Střední deformační odpor

Je ukázkou tlaku a odezvou kovu proti vnější síle, která má vliv na těleso se záměrem vyvolat jeho změnu stavu [11, 12, 13].

$$\sigma_d = \beta \cdot \sigma_p + q \quad (2.4)$$

Kde

β – součinitel stavu napjatosti,

σ_p – přirozený deformační odpor,

q – nejmenší hlavní napětí.

Oblasti ztížené deformace jsou nejčastěji v přilehajících oblastech. K nim také přilehají oblasti výrazných smykových deformací, ve kterých probíhá nejintenzivnější deformace. Při relativně malých úběrech je ve středu tloušťky oblast smíšených napětí. Tlaková napětí působí v radiálním směru a v zbylých dvou směrech tahová [11, 14].

Pro válcování kroužku je typickým příkladem pásma přilnutí. Pokud je délka kontaktu nástrojů malá k tvářenému polotovaru je to oblast ztížené deformace a ta zasahuje do veškeré délky oblouku [8].

Pokud je kontaktní délka nástrojů vzhledem k tloušťce tvářeného polotovaru velká, oblast ztížené deformace zabírá jen specifickou část záběrového oblouku.

Na vstupní straně je pásmo zpoždění, tvářený materiál se pohybuje menší rychlostí, než je obvodová rychlost válců. Na výstupní straně je pásmo předstihu, kde se tvářený materiál pohybuje rychleji, než je obvodová rychlost válců. V tomto případě v ose provalku nepůsobí ve vodorovném směru tahová pnutí, oblast smíšených napětí se objevuje pouze na okraji [15].

Na vnitřní a vnější válec musí platit rovnost sil:

$$\sigma_{pe} \cdot Q_f \cdot l_{de} \cdot h = \sigma_{pi} \cdot Q_f \cdot l_{di} \cdot h \quad (2.5)$$

Kde

h - je výška kroužku.

Pro výpočet deformačního odporu lze použít i vztah [3]:

$$\sigma_{po} \cdot e^{m_1 T} \left(\frac{2\Delta S_e}{S} \right)^{m_2} \cdot \dot{\epsilon}^{m_3} \cdot h \sqrt{2\Delta S_e R_e} = \sigma_{po} \cdot e^{m_1 T} \left(\frac{2\Delta S_i}{S} \right)^{m_2} \cdot \dot{\epsilon}^{m_3} \cdot h \sqrt{2\Delta S_i R_i} \quad (2.6)$$

Kde

$\sigma_{po}, m_1, m_2, m_3$ – materiálové konstanty,

T – teplota,

$\dot{\epsilon}$ – deformační rychlost.

Po úpravě dostaneme:

$$\frac{D_i}{D_e} = \left(\frac{\Delta S_e}{\Delta S_i} \right)^{1+2n} \quad (2.7)$$

Kde

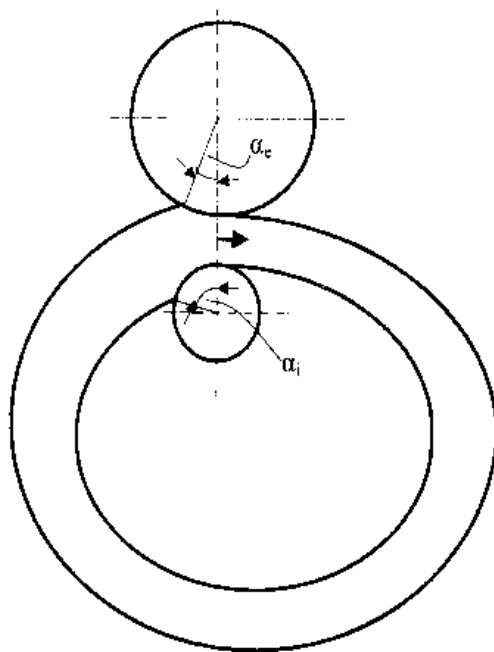
n – exponent zpevnění místo konstanty m_2 ,

D_i – průměr vnitřního válce,

D_e – průměr vnějšího válce.

2.1.5 Geometrické poměry

Geometrický úběr je výrazně větší na vnitřní straně než úběr z vnější strany. Výsledkem toho se více prodlužují vlákna na vnitřním povrchu kroužku, což se ukazuje tím, že se kroužek v oblasti deformace „narovnává“ (Obr. 4).



Obr. 4 – Geometrické poměry při válcování kroužku [3]

Při větším úběru je výraznější ovalizace, to znamená, že při menších úběrech je menší deformace v pásnu. V praxi se reguluje geometrie pomocí přítlačných válců a vhodným režimem úběru, jak bude uvedeno dále.

2.1.6 Záběrový úhel

Další důležitou veličinou při válcování je záběrový úhel. Jak je uvedeno u obrázku 4, tak rozeznáváme dva úhly záběru. Vnější úhel záběru a vnitřní uhel záběru. Důležitou podmínkou je splnění jednoho ze vztahu [8]:

$$\operatorname{tg} \alpha_e f_c ; \operatorname{tg} \alpha_i f_c \quad (2.8)$$

Kde

f – koeficient tření mezi válcem a tvářeným materiálem,

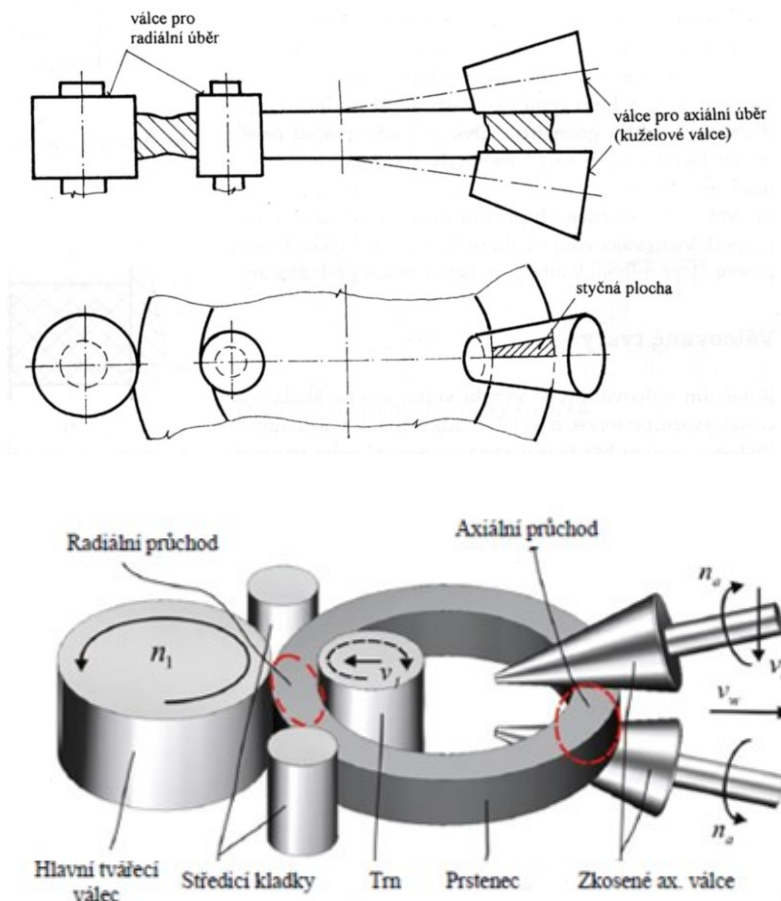
α_e – vnější úhel,

α_i – vnitřní úhel.

Pokud bude samostatně poháněn pouze vnější válec, což platí pro většinu rozválcovaček, je brát v potaz, aby byla splněna první z těchto podmínek. Při válcování kroužků jsou relativně malé úběry za jednu otáčku čili je i malý záběrový úhel. Na druhé

straně, když dojde „k prokluzu“, tak se válcovaný kroužek posune a tím se změní geometrické rozměry [16].

Na obr. 5 lze vidět schéma radiálně-axiální válcovačky, která má válce pro redukci výšky kroužku. Kuželovitý tvar musí mít válce pro axiální úběr a jejich osa musí protínat osu válcovaného kroužku v rovině čela, aby nedocházelo k nepříznivému prokluzu. Z tohoto důvodu se při válcování musí od středu posunout kuželové válce válcovaného kroužku a současně s tím, jak narůstá jeho průměr. Zpravidla však nelze zajistit dodržení této podmínky v celém rozsahu válcovaných průměrů [9].



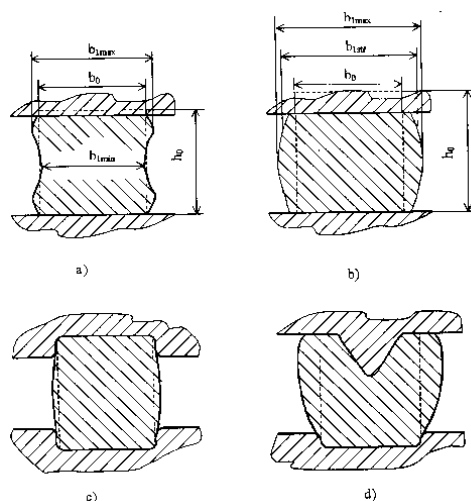
Obr. 5 – Schéma válcování na radiálně-axiální válcovačce [9, 17]

Plocha kuželových válců při kontaktu s tvářeným kroužkem má zhruba lichoběžníkový tvar, tedy délka pásma deformace je proměnlivá.

2.1.7 Šíření

Při válcování vzniká také další problém a jedná se o šíření. Označení jako volné šíření vzniká při válcování na hladkých válcích. Pokud se válcuje v kalibrech, může to vést

v závislosti na geometrii kalibru k vynucenému nebo omezenému šíření (Obr. 6) [4, 18].



Obr. 6 – Druhy šíření

Na snímku 6a lze vidět volné šíření při válcování s malým úběrem. Dále na snímku 6b je také volné šíření při válcování, ale s velkým úběrem. U snímku 6c se jedná o šíření omezené a poslední 6d vzniká vynucené šíření.

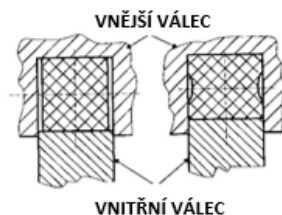
Volné šíření Δb se počítá podle vzorce:

$$\Delta b = \frac{\Delta S}{6} = \sqrt{\frac{R}{s_0}} \quad (2.9)$$

Kde za hodnotu R dosazujeme střední hodnotu průměru válců:

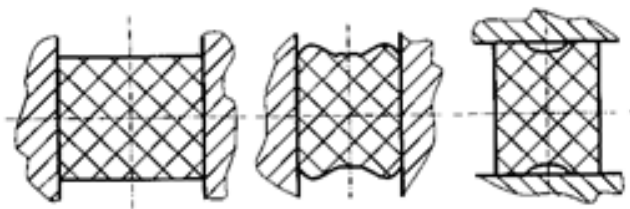
$$R = 0,5(R_e + R_i) \quad (2.10)$$

Pro válcování kroužků na hladkých válcích je typické, že se pracuje s malým úběrem za jednu otáčku (na radiálních i axiálních válcích), pak vzniká po výšce kroužku dvojitá soudkovitost (Obr. 7) [3].



Obr. 7 - Vznik žlábků při válcování hladkého kroužku v kalibru [19]

U hladkých válců na radiálně-axiální válcovačce se válcují jednoduché tvary. Dvojitá soudkovitost vznikající mezi jedním párem válců a může být eliminována druhým párem válců. U tohoto typu jsou lepší podmínky pro dosažení přesného tvaru. Ale pokud nejsou úběry dostatečné, může se také objevit dvojitá soudkovitost (Obr. 8) [3,18].



Obr. 8 – Vznik žlábků na radiální-axiální válcovačce

2.2 Válcované tvary

Rozválcováním se vyrábí velká produkce součástek tvaru kroužků, a to jak na tvarových, tak hladkých válcích. Kroužky mohou být tvarované na vnitřním nebo vnějším povrchu. Kroužky tvarované na čelech se běžně válcují jenom na axiálních válcovačkách. Můžeme je zařadit do několik skupin:

- Kroužky pro valivá ložiska skoro všech průměrů. Válcují se s předválcovanými drážkami, tak i hladké
- Obruče na kola kolejových vozidel, především vagonů, tramvají, jeřábů apod. Obruče pro jeřábová dopravní kola mají rovnou pojezdovou plochu a dva náklony a obruče pro vagóny mají šikmou pojezdovou plochu.
- Příruby, opěrné prstence a další díly pro potrubí, výztužné kroužky, zásobníky
- Polotovary pro výrobu rotačních hnacích součástí a ozubených věnců
- Polotovary pro řetězová kola a vodící bandáže pro řetězem tažená vozidla
- Prstencové součástky pro letecký a kosmický průmysl, těžbu ropy z mořského dna
- Polotovary pro zápusťkové kování
- Ozubené věnce

Jestliže jde o hladké součástky, které nepotřebují specifickou kalibraci válců, je ekonomičtější malosériová výroba, která přiléhá s kusovou výrobou. Hlavně radiálně-axiální válcovačku lze z tohoto hlediska pokládat za všestranný stroj, protože k válcování hladkých kroužků není potřebné mít kalibrované válce [20, 21, 22]

2.3 Materiál kroužků a charakteristika rozměrů

S výjimkou různých ocelí se válcují kroužky z více slitin počítaje slitin titanu a hliníku, dále také měď a její slitiny a také z těžce tvářitelných slitin na bázi kobaltu a niklu.

2.4 Typy strojů pro válcování kroužků

Existuje celá řada druhů a variant válcovaček. Můžeme je dělit do několika tříd. Prvním hlediskem podle způsobu tváření [3, 9]:

- a) Radiální (Obr. 9),
- b) Radiálně-axiální (Obr. 10),
- c) Axiální (orbitální).



Obr. 9 - Radiální válcování [23]



Obr. 10 - Radiálně-axiální válcování

Nejjednodušší jsou radiální válcovačky, potřebují však válcování v uzavřených kalibrech. Radiálně-Axiální válcovačky mohou vyválcovat celou řadu různých velikostí. Pro válcování velkých kroužků profilovaných na čele, jsou vhodné axiální válcovačky. Dále se na nich válcují geometricky složité kroužky. Považují se zvláštní druh tvářecích strojů a zvyklostí se nezahrnují mezi válcovačky [9].

Podle pohonu přitlačného válce rozeznáváme válcovačky:

- a) Mechanické,
- b) Hydraulické.

Zde je míněn pohon, který zajišťuje vzájemné přibližování válců, rotační pohon válců je pokaždé mechanický. Podle polohy osy tvářeného materiálu existují válcovačky:

- a) Svislé (Obr. 9)
- b) Vodorovné (Obr. 10)

c) Šikmé

Kroužky malých průměru se většinou válcují tak, že jejich osa je vodorovná při válcování. Ostatní válcovačky pracují se svislou osou. Podle uchycení válců pro radiální úběr rozeznáváme válcovačky [9]:

- a) S letnými válci
- b) S válci upevněnými na obou koncích
- c) Kombinované

Při upevnění válců na obou koncích musí být jeden rám spojující válce odnímatelný, aby bylo možné uložit do pracovního prostoru polotovár a vyjmout hotový kroužek. Kombinované válcovačky mají vnitřní válec, který má menší průměr, uchycený na obou koncích. Podle počtu středních válců rozeznáváme válcovačky [9]:

- a) Jednotrnové
- b) Vícetrnové

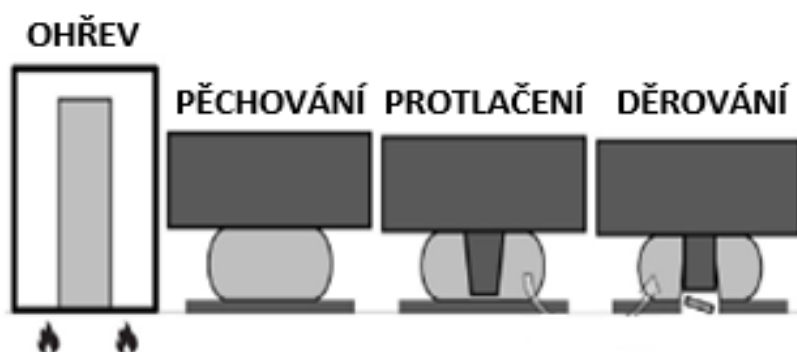
3 Analýza postupu výroby válcovaných kroužků

Tváření kroužků se vždy dělá ve dvou krocích. Prvním krokem je předkování, kdy se získává děrovaný a eventuálně i jinak předtvarovaný rozkovek. Druhý krok je vlastní válcování, které se obvykle provádí na jedné válcovačce. Operace předkování se provádí volným kováním na bucharu nebo na lisu, pro menší rozměry kroužku se polotovary mohou předkovat na vodorovném kovacím lisu [16, 24, 25].

3.1 Technologie válcování hladkých kroužků

Při válcování je třeba zhodnotit geometrické parametry konečného kroužku a zhotovit předkovek o dané výšce. Při válcování na radiálně-axiální válcovačce má předkovek větší tloušťku, než je požadovaná tloušťka konečného kroužku. Výchozí polotovar se volí tak, aby se při válcování došlo k 1,5 až 3násobnému zmenšení tloušťky stěny, pouze u menších hodnot se volí obvykle 2 až 2,5krát, je to zejména pro tvrdší materiály a pro větší kroužky [3].

Předkovky lze vyrobit několika způsoby. Při velkosériové výrobě kroužků malého průměru se předkovává v zápustce. A při malosériové výrobě velkých kroužků se polotovar pro válcování vyrábí volným kováním (Obr. 11).



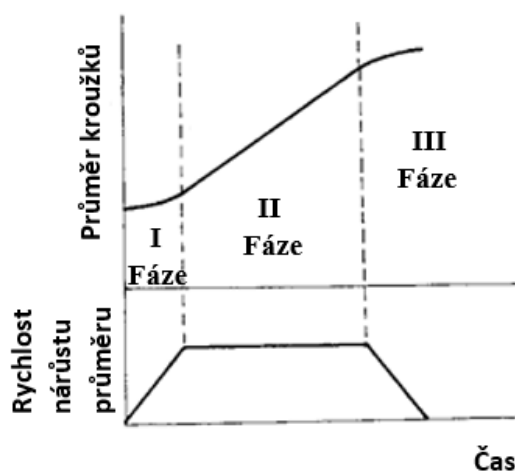
Obr. 11 – Schéma postupu předkovky před válcováním

Výchozí špalek se napěchuje, pak se předděruje v protlačovací dutině, a nakonec se vystříhne blána. Tenhle postup je velmi rozšířený. Předkování v protlačovací dutině vyžaduje sice použití vyhazovače, avšak získává se tak předkovek bez úkosů [24, 25].

Pod hydraulickým lisem se předkovávají polotovary pro kroužky většího průměru. Hydraulický lis nesnáší překonávat excentrické síly, musí se nástroje přenést tak, aby se kovalo v aktuální ose lisu. Druhá možnost je zařadit váhu před lis, která zjistí hmotnost ohřátého polotovaru a podle ní se vypočte tloušťka vystřižené blány tak, aby měl předkovek požadovanou hmotnost. Tloušťka vystřihované blány lze totiž při kování na hydraulickém lisu regulovat. Tvarem předkovky lze do určité míry potlačit vznik žlábků při válcování [3, 24, 25].

U předkovku s jedním vydutým čelem, což je tvar, který vzniká stažením hrany při děrování, vzniká po vyválnování žlábků pouze na původně rovném čele. Při předkování vydutých čel v zápustce je nebezpečí vzniku žlábků nejmenší.

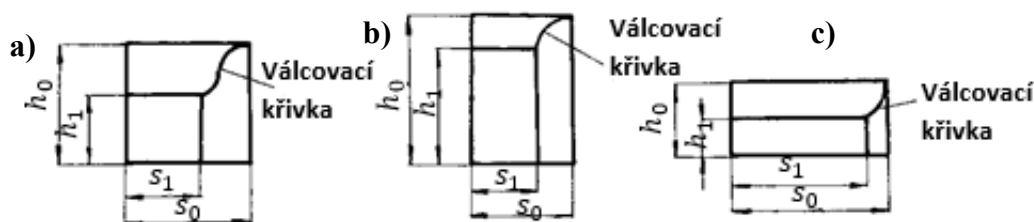
Při válcování je též důležitá velikost úběru na jednu otáčku. Velký úběr zabraňuje vzniku žlábků, avšak kroužek se ovalizuje. U radiálních válcovaček se reguluje úběr a tím nárůst průměru kroužku podle křivky uvedené na (Obr. 12) [26].



Obr. 12 – Optimální průběh nárůstu průměru kroužku při válcování [26]

V první fázi se vyrovnávají nerovnosti předkovku, průměr kroužku narůstá pomalu. Ve druhé fázi narůstá průměr konstantní rychlostí. Ve třetí fázi se upřesní rozměry. U radiálně-axiální válcovačky je navíc nutné dbát na synchronizaci rychlosti axiálních a radiálních válců, nesoulad mezi jejich obvodovými rychlostmi rovněž způsobuje ovalitu vyválnovaného kroužku. U moderních válcovaček se měří tlak na přítlačné kladky, rychlost axiálních válců se upravuje tak, aby tento tlak byl stejný.

Dále se měří rychlost nárůstu průměru a podle ní se reguluje přítlačná síla. Režim úběrů v axiálním a radiálním směru se volí podle poměru výšky a tloušťky kroužku. Schéma na (Obr. 13) představuje průřez předkovku a hotového kroužku a optimální křivku pro přechod z jednoho průřezu do druhého [3, 26].



Obr. 13 – Schéma optimální technologie válcování kroužků: a) čtvercový průřez, b) vysoký kroužek, c) plochý kroužek [3]

Při válcování kroužku čtvercového průřezu (a) je vhodné nejdříve zmenšovat intenzivně výšku, ve střední části válcování ubírat intenzivně tloušťku a na konci opět ubírat intenzivně tloušťku.

Při válcování vysokého kroužku (b) je vhodné zpočátku ubírat intenzivně tloušťku a v závěrečné fázi redukovat výšku. Je to dáno tím, že štíhlá vysoká stěna kroužku má malou stabilitu, proto se ubírá zpočátku minimálně výška, výrazný výškový úběr na konci válcování má za cíl omezit vznik žlábků.

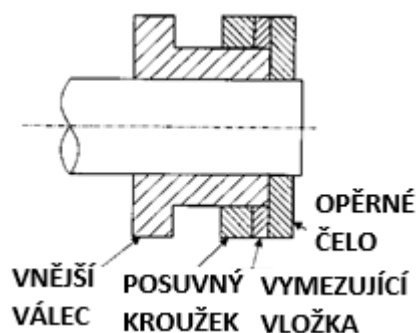
U plochých kroužků se naopak v počáteční fázi více ubírá výška a v závěrečné fázi se více ubírá v radiálním směru. Důvodem je opět nebezpečí ztráty stability štíhlého průřezu, které by se negativně projevilo na geometrické přesnosti.

I při válcování na radiálně-axiální válcovačce je třeba kromě vhodného režimu přibližování válců správně volit rychlost otáčení válců. Jestliže se volí příliš velká rychlost otáčení, pak je na jednu otáčku malý úběr, vzniká výraznější dvojí soudkovitost, kterou se již nepodaří odstranit. Následkem jsou žlábký na čelech nebo na bocích (Obr. 14) [27].



Obr. 14 – Vady kroužků válcovaných na radiální-axiální válcovačce: a) nedostatečný radiální úběr, b) nedostatečný axiální úběr

Na radiální válcovačce lze v jednom kalibru válcovat kroužky různé tloušťky ovšem jen jedné výšky. Aby se omezily náklady na nářadí, tak se někdy používají vnější válce se stavitelnou šířkou kalibru. Princip konstrukčního řešení takového válce je na (Obr. 15).



Obr. 15 – Schéma konstrukce kalibru s nastavitelnou šířkou

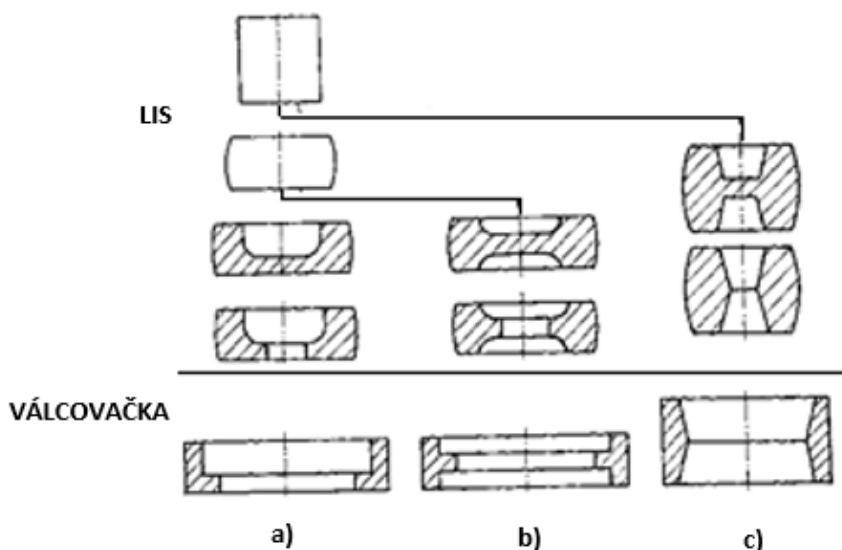
Válec má jednu pevnou boční stěnu kalibru, druhá je posuvná. Šířka kalibru se vymezuje vkládáním kroužku a na čele se zajišťuje opěrným kroužkem, který se upevňuje například šrouby. Vnitřní válec však musí být pro každou šířku kalibru jiný.

Válcované kroužky se na funkčních plochách obrábějí. Například u ložiskových kroužků se obrábějí všechny plochy u obručí pro železniční kola se obrábí vnější a vnitřní plocha, čela se ponechávají ve stavu po vyválnování. Přídavky na obrábění se volí podle velikosti kroužku, podle tvrdosti tvářeného materiálu a s ohledem na tuhost válcovačky V přídavcích by se mělo skrýt zokujení, oduhličení a další povrchové vady, a především geometrické nepřesnosti, jako jsou žlábký a ovalita.

Přídavky na obrábění u malých kroužků činí méně než 5 mm, avšak i tak ztráta materiálu činí více než 50 %. Naproti tomu u kroužků největšího průměru jsou přídavky na obrábění větší než 10 mm, celková ztráta materiálu je však jen asi 15 %.

3.2 Technologie válcování profilových kroužků

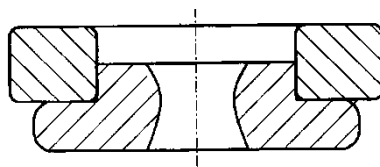
Při válcování profilových kroužků se zpravidla vychází z tvarového předkovku. Pro kroužky malých průměrů se často tvarový předkovek vyrábí v zápustce. Tvarové předkovky pro kroužky středního a velkého průřezu se zhotovují volným kováním (Obr. 16).



Obr. 16 – Výroba tvarových předkovek volným kováním: a) předkovek pro kroužek profilu L, b) předkovek pro kroužek profilu T, c) předkovek pro kroužek s vnitřní kuželovitostí [9]

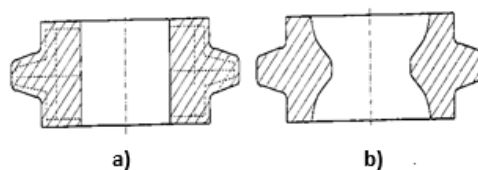
Pro kroužek profilu L s přírubou směrem dovnitř se předděrování provádí trnem většího průměru a děrování se dokončuje trnem menšího průměru. Pro kroužek profilu T s přírubou směrem dovnitř se před děrovává dvěma trny většího průměru z obou stran, děrování se dokončuje trnem menšího průměru. Předkovek pro pouzdro se vyrábí za tlačení dvou kuželových trnů z obou stran [3].

Výroba některých tvarů předkovek vyžaduje přípravky. Příklad je na (Obr. 17), kde je tvarování předkovku pro kroužek profilu L s přírubou směrem ven.



Obr. 17 – Tvarování předkovku profilu L

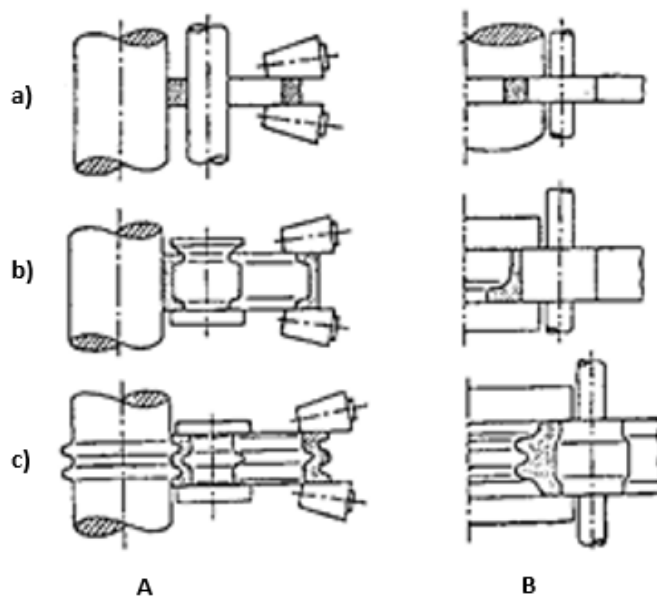
Tvarování se provádí pomocí prstence. Výhodnější je však válcovat souměrné profily. Pokud to je možné tak se nesouměrné profily válcují jako dvojkusy. Příklad je na (Obr. 18), kde jsou dvě varianty předkovku pro válcování vývalku dvojkusů příruby [3, 4].



Obr. 18 – Předkovek pro válcování dvojkusu příruby: a) předkovek profilu T, b) předkovek zajišťující rovnoměrný úběr do vybrání v kalibru

Předkovek má na obvodu žebro, které zapadne do vybrání v kalibru. Při válcování je však v tomto případě poměrný úběr velmi nerovnoměrný, u čel kroužku je vyšší, v oblasti žebra je nižší. Druhá varianta tvarového předkovku zajišťuje poměrně rovnoměrný úběr při následujícím válcování.

Tvarový předkovek se u radiální válcovačky opět válcuje v uzavřeném kalibru, u radiálně-axiální válcovačky se i u profilovaných kroužků upravuje výška kuželovými válci. Porovnání obou postupů je na (Obr. 19).

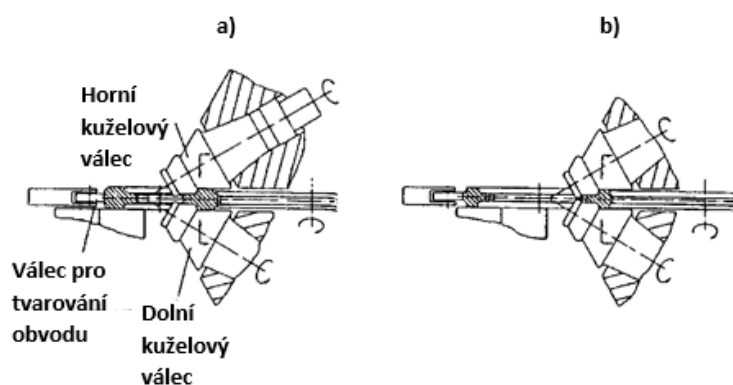


Obr. 19 – Válcování v otevřeném (A) a uzavřeném (B) kalibru: a) hladký kroužek, b + c) profilovaný kroužek [9]

3.3 Speciální postupy válcování kroužků

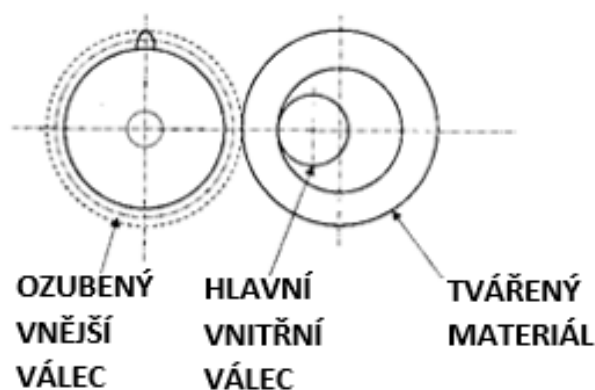
Ve výrobních závodech se nejčastěji řeší válcování různě profilovaných kroužků. V ČR bylo zvládnuto válcování řady profilů tvarovaných na vnitřním nebo vnějším povrchu. Kroužky a prstence tvarované na čelech lze válcovat pouze na axiálních válcovačkách. Na výzkumných pracovištích se řeší válcování kroužků tvarovaných na čele na radiálně-axiální válcovačce. Příslušný kuželový válec musí být profilován. Problémem je přesná

synchronizace posuvu kuželových válců s nárůstem průměru válcovaného kroužku. Nejjednodušší je, když se prakticky netvaruje v radiálním směru (Obr. 20). Plochý profilovaný kroužek se tvaruje pouze mezi profilovanými kuželovými válci a na konci procesu se tvaruje jeho obvod válcem, který se nachází mezi kuželovými válci a není poháněný [3].



Obr. 20 – Válcování profilovaného kroužku na obou čelech [9]

Na několika pracovištích ve světě se pracuje na vývoji nových technologií, které by bylo možné provozovat na konvenčních radiálních či radiálně-axiálních válcovačkách, které ve světě představují velmi rozšířený tvářecí stroj. Již dlouhou dobu se řeší válcování ozubených věnců včetně vytvoření zubů tvářením. Jednoduchý postup je znázorněn na (Obr. 21). Používá se hladký vnitřní válec a vnější válec s ozubením.

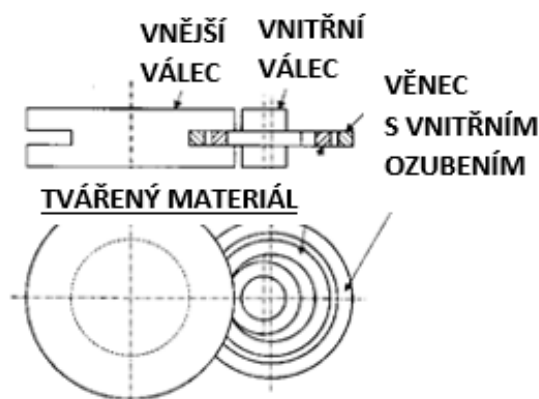


Obr. 21 – Válcování ozubeného věnce s použitím ozubeného vnějšího válce

Tvářený materiál musí mít přesné rozměry, průměr kroužku se při válcování již příliš nezmění, pouze se vytvarují zuby. Povrch zubů však není kvalitní a vyžaduje obrábění. Je to způsobeno odvalováním, při němž se hrany a boky zubů na tvářeném věnci a vnějším válci po

sobě posunují na dlouhé dráze. Poměrně dobré výsledky lze takto získat při tváření mosazi za studena.

Lepší výsledky dává upravený postup znázorněný na (Obr. 22). Používá vnější válec s hladkým kalibrem a hladký vnitřní válec, a navíc je zde tvarovací věnec s vnitřním ozubením, v němž je uložen tvářený materiál. Při tomto řešení se již odvalování neuplatňuje a povrch zubů je výrazně lepší.



Obr. 22 – Válcování ozubeného věnce s použitím věnce s vnitřním ozubením

3.4 Technologický postup výroby kroužků v společnosti AM Brück

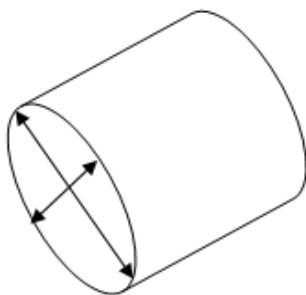
3.4.1 Výběr materiálů

Zkontroluje se chemické složení příslušné tavby s požadavkem zákazníka na chemické složení. Výběr se zapíše do předpisu tepelného tváření. Dále zkontroluje se požadavek na zkušební vzorek dle elektronické evidence a sestaví se řezný plán jednotlivých tyčí. Výběr kusu na destruktivní zkoušení se řídí následujícími pravidly:

- Jedná se o první kus z nově použité tavby nebo první kus k nově použité normě Bruforg
- Jedná se o normu, kde je vzorek nedílnou součástí každé výrobní dávky (např. tramvajová kola).
- Jedná se o zakázku, na které je od QS předepsaný vzorek (probe „Ano“), přičemž vzorky na tyto tavby nelze v žádném případě zaměňovat s jinými, tzn. I při použití stejné tavby a normy musí být nařezán a označen nový “probe kus“

3.4.2 Měření vstupního průměru

Měření vnějšího průměru materiálu se provádí na již odříznutém čele tyče. Měření se provádí na několika místech metrem, vždy však minimálně na dvou protilehlých místech (Obr. 23).



Obr. 23 – Schéma měření tyče

Pro výpočet délky řezaného bloku se používá nejnižší naměřená hodnota, případně zaokrouhlená na násobek 5.

Vzorec pro výpočet délky tyče:

$$l = \frac{4 \cdot m}{\rho \cdot \pi \cdot d^2} \quad (3.1)$$

Kde

l – délka kusu,

m – hmotnost kusu,

ρ – hustota oceli 7850 kg/m³,

π – Ludolfovo číslo,

d – průměr kusu.

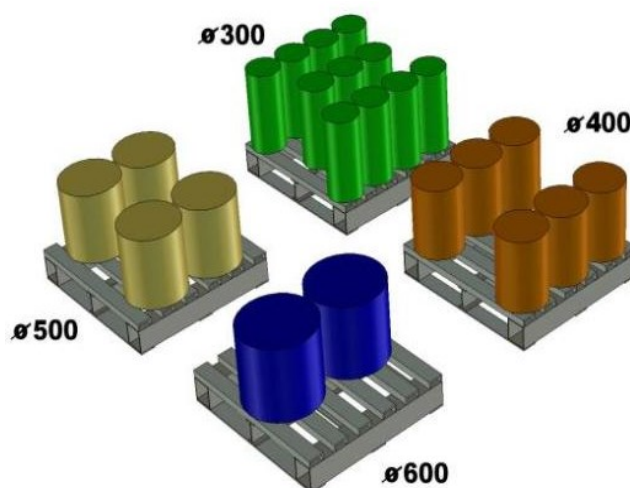
3.4.3 Řezání

Operace řezání se provádí na kotoučové pile nebo na pásových pilách (Obr.24). Požadované délky bloků jsou uvedeny ve VPK. Pily se nastavují podle nejmenšího průměru řezané tyče. V případě ingotů bez oddělené hlavové nebo patové části se musí odříznout minimálně 50 mm délky tyče od hlavy a 20 mm od paty pro odstranění nežádoucího materiálu s nekvalitní strukturou.



Obr. 24 – Kotoučová pila

Průběžně se kontrolují délky jednotlivých bloků metrem. Uříznuté bloky do průměru 600 mm se ukládají na palety na uříznuta čela. Každý blok je popsán barvou (zakázka, tavba, index tyče, hmotnost a pořadové číslo řezu v zakázce). Palety s nařezaným materiálem se ukládají do vyznačených zón (Obr. 25). Písmeno zóny, kam je paleta umístěna, je zapsána do VPK.



Obr. 25 – Ukládání bloků na palety

3.4.4 Založení bloků do pecí

Studené bloky se zakládají přímo do vytopené pece na kovací teplotu. Bloky se zakládají podle plánu. Založené bloky se evidují při založení do karuselové pece (Obr. 26). Při založení do komorové pece (Obr. 27) se zaznamená pořadí jednotlivých bloků na tabuli umístěné na peci. Kusy v zadní řadě se zapisují do horní části a kusy v přední části do dolní části tabule.



Obr. 26 – Karuselova pec



Obr. 27 – Komorová pec

3.4.5 Ohřev a přihřev

Předepsaná výdrž na teplotě nesmí být překročena. Předpis vstupní kovací a dokovací teploty je uveden ve výrobním plánu. Doba výdrže je uvedena v (Tab. 2). Pro učení doby výdrže obecně platí, že 100 mm průměru nebo tloušťky, 1 hodina výdrže na kovací teplotě.

Tabulka 2 Doba výdrže po dosažení kovací teploty

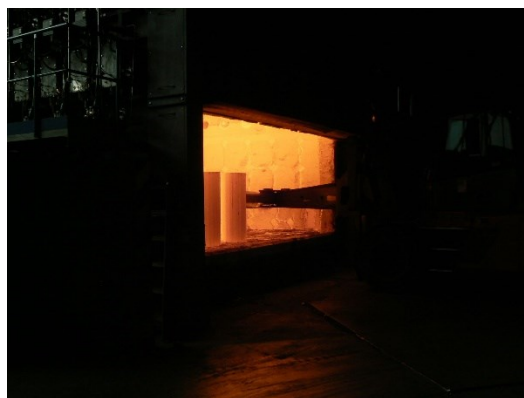
Průměr (tloušťka) bloku	Doba výdrže (hod)	Poznámka
300	3,0	---
400	4,0	---
500	5,0	---
600	6,0	---
800	7,5	Fázový ohřev na 860 °C
1000	9,0	Fázový ohřev na 860 °C

Příhřev rozkovaného materiálu (dohřev) se provádí vsazením přímo na kovací teplotu na dobu uvedenou v (Tab. 3).

Tabulka 3 Doba příhřevu na kovací teplotu

Průměr nebo tloušťka (mm)	Minimální doby výdrží na teplotě při příhřevech (hod)				
	Teplota povrchu při zakládání do pece (°C)				
	800	850	900	950	1000
100	1,25	1	0,75	0,5	0,25
150	1,5	1,25	1	0,75	0,5
200	1,75	1,5	1,25	1	0,75
300	2,75	2,5	2	1,5	1
400	3	2,5	2,25	2	1,25
500	3,5	3	2,5	2	1,5
600	5	4	3	2,5	2

Tyto minimální doby výdrží je možno uplatnit za předpokladu rovnoměrného prohřátí prostoru pece a vsázky před vložením přihřívajícího kusu (Obr. 28 a, b).

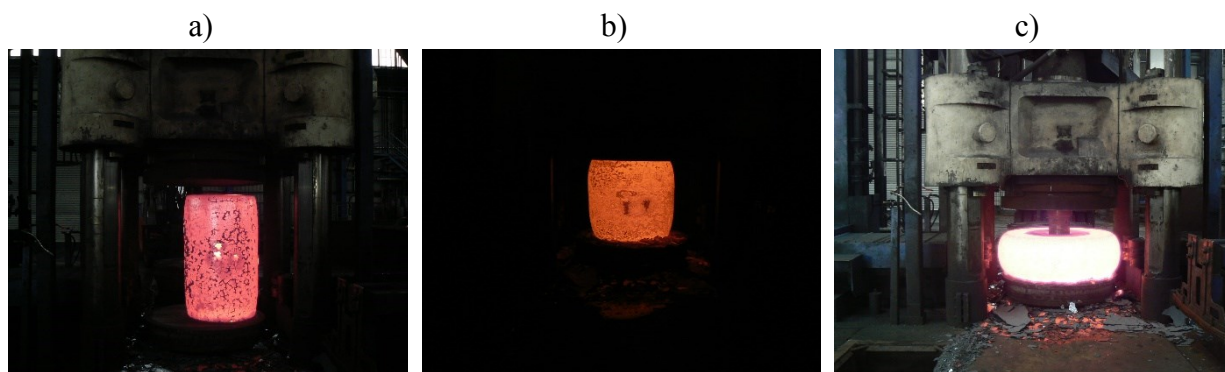


Obr. 28 – Doba příhřevu: a) karuselova pec, b) komorová pec

Při vyjímání kusu z pece se kontroluje rovnoměrnost prohřátí pyrometrem a dle potřeby se příslušnému kusu vydrž na kovací teplotě prodlouží. V případě častého otvírání pece a ochlazení přední části pece o více než 70 °C, než je stanovena kovací teplota je nutné ponechat pec zavřenou po dobu náhřevu na kovací teplotu a výdrže 0,5 hod.

3.4.6 Kování

Provádí se na lisu RPH-S 3500. Slouží k předkování a pēchování bloku a jeho děrování (Obr. 29). Výrobní parametry se nastavují na hodnoty uvedené ve výrobním příkazu. Pravidelně se kontroluje stav nástrojů a jejich opotřebení. V případě nadměrného opotřebení nástrojů se kování zastaví a nástroje se vymění.

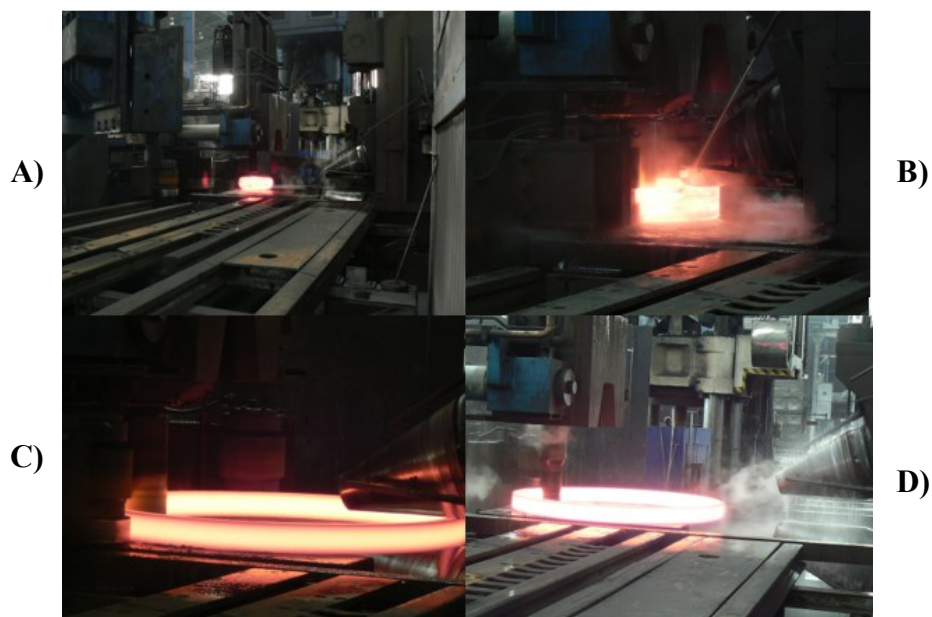


Obr. 29 – Technologické operace: a) předkování, b) pēchování, c) děrování

Po vykování prvního předkovku ve výrobní sekvenci se změří teplota bezdotykovým pyrometrem a rozměry polotovaru pomocí posuvného měřítka. Hotový předkovek se otočí okolo vodorovné osy a zkontroluje se provedení střihu. Předkovek je pomocí vysokozdvížného vozíku (dále VHZ) uložen do pece k příhřevu před další operací.

3.4.7 Válcování kroužků

Operace válcování se provádí na stroji RAW 250/200 (radiálně-axiální rozválcovací stroj) (Obr. 30).



Obr. 30 – Postup radiálně axiálního válcování (postupně A ,B, C, D)

Při vložení se umístí polotovár na válcovací stůl, tak aby nedošlo ke kolizi s vysunutým válcovaným trnem. Rozměrové a technologické informace (např. počet rozválnování) jsou obsaženy ve výrobním příkazu.

Program válcování se ukládá do databáze. Pečlivě se zapíše parametry válcování a je povinné zaznamenat všechny odchylky do výrobního příkazu pro zabezpečení následného bezchybného válcování stejného zboží.

Při válcování výkovku převyšujících hmotnost 4 000 kg jej výkovek vytahován ze stolu RAW pomocí VZV směrem k lisu bez použití manipulátoru.

3.4.8 Měření výkovku

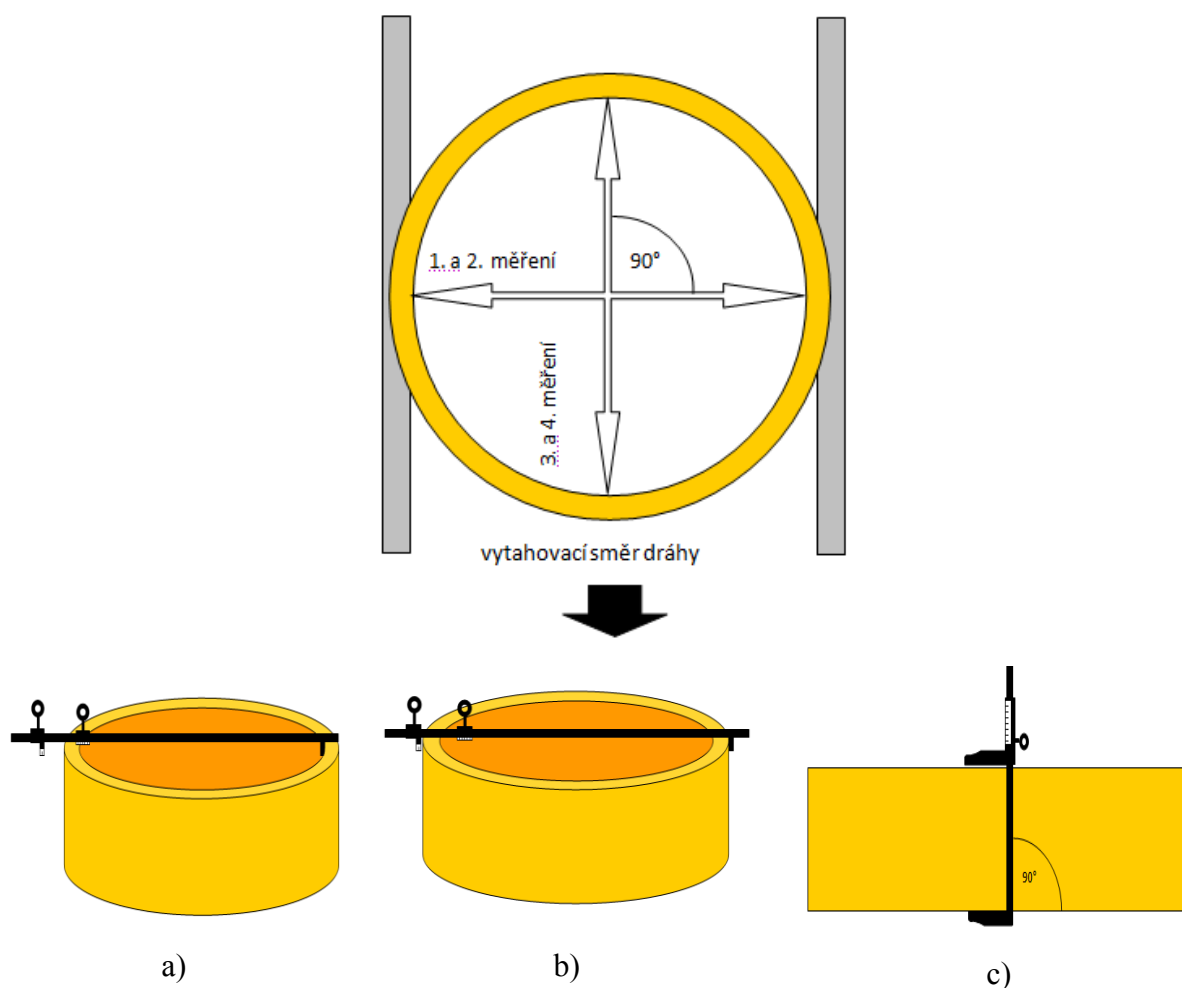
Při měření výkovku se měří:

- Teplota výkovku po válcování
- Vnitřní průměr
- Vnější průměr
- Výška výkovku
- Výška profilu u profilovaných výkovků

Měření teploty se provádí pyrometrem ihned po vyválnování na každém prvním, popř. druhém výkovku daného zboží. Tento postup se provádí po každém přerušení válcování (např. po chlazení RAW). Teplota výkovku po válcování se měří v polovině výšky výkovku na vnějším průměru. Měřená plocha nesmí být znečištěna okujemi. Měření se provádí kolmo na měřený povrch. Hodnota se zapisuje do databáze.

Měření vnitřního a vnějšího průměru výkovku za tepla se provádí poměrovým měřidlem, nebo posuvným měřidlem vždy ve dvou osách výkovku o 90° k sobě otočeným křížem (Obr. 31 a, b, c).

Při měření sérií do tří výkovků se měří každý výkovek křížem. Při sériích o více, než třech výkovcích jednoho sortimentu se měření křížem používá pouze na prvních třech výkovcích, poté stačí měřit pouze v ose kolmé na vytahovací západkovou dráhu (Obr. 31 a, b, c.).



Obr. 31 – Schéma měření výkovku: a) vnitřního průměru, b) vnějšího průměru, c) výšky výkovku

Po každém měření se zajistí předání aktuální naměřené hodnoty do databáze. Průběžně se kontroluje nastavení poměrného měřidla z důvodu ovlivnění teplenou roztažností materiálu.

U výkovků, kde jejich výška je minimálně 6x větší než stěna nebo profilovaných výkovků se provádí měření vnitřního a vnějšího průměru i na spodní straně výkovku.

Pro měření je možné použít speciální verze poměrového měřidla.

Poměrové měřidlo se nastavuje pomocí upraveného posuvného měřidla, které je instalované na stole v prostoru měření, hodnoty nad 3000 mm se nastavují pomocí svinovacího metru.

3.4.9 Ražení a označování výkovků

Značení musí odpovídat směrnici SM_Q_07 pro sledovatelnost materiálu. Ražení se provádí po doválcování výkovků (Obr. 31). Před ražením se nastavuje na příslušné raznice:

- Číslo zakázky
- Číslo tavby
- Pořadové číslo

Opticky se zkontrolují vyražená čísla a zapíše se do databáze.



Obr. 31 – Značení materiálu ražením (číslo zakázky, číslo tavby, pořadové číslo)

3.4.10 Uložení výkovku po doválcování

Výkovek s do válcovací teplotou se po vyražení ukládá do databáze: pořadové číslo, číslo tavby, číslo zakázky a rozměry např. $\phi 2400/\phi 1300 \times 240$ mm.

Výkovky s předepsaným chladnutím na hale je možné odvést po zchladnutí kusů pod teplotu 400 °C, hodnota teploty se ověří pyrometrem u každého odváženého stohu (nastavení emisivity pyrometru zůstává stejné jako na horké výkovky).

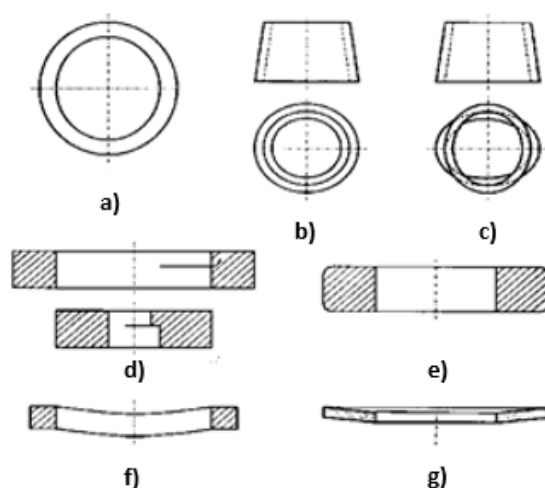
Kroužky teplejší jak 450 °C je důrazně zakázáno vyvážet z haly v případech prudkého deště, bouřky, silného větru, nárazového větru a hustého sněžení z důvodu tvorby ovality kruhů.

3.4.11 Výstupní kontrola

Před odvozem kusů na další technologickou operaci (VT) se provede vizuální kontrola kusu.

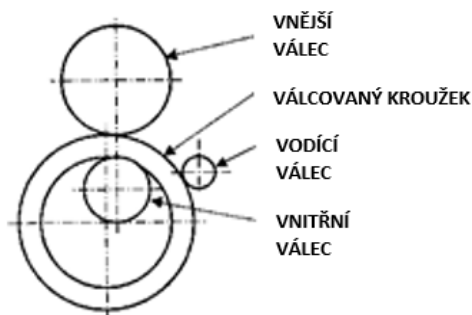
4 Vliv postupu výroby kroužků na vznik povrchových a vnitřních vad

Vady kroužků lze, stejně jako vady ostatních kovárenských výrobků, rozdělit do několika skupin. I zde obecně platí, že u větších výrobků je větší nebezpečí výskytu vad. Časté jsou vady nepřesné geometrie. Příčina nejčastějších vad, a to drážek, byla rozebrána výše. Ostatní vady jsou přehledně znázorněny na (Obr. 32).



Obr. 32 – Geometrické vady válcovaných kroužků: a) ovalita, b) kuželovitost, c) zkřížená ovalita, d) přeložka vnějšího válce, e) nezaplněné rohy, f) prohnutí, g) zkosení průřezu

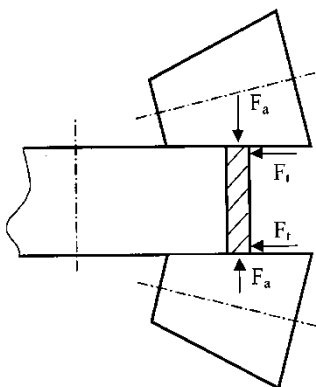
Příčina vzniku ovality (Obr. 32 a) byla rovněž už vysvětlena v (Obr. 4). Při správném technologickém postupu, kdy se postupně zvětšuje úběr na potřebnou hodnotu a v závěru válcování se zase snižuje, by se měla snižovat ovalita na minimum. Ovšem u materiálů s vyšší pevností nelze válcovat s dostatečným úběrem a u kroužků zůstává ovalita. Velkou pevnost mají ložiskové oceli, což je častý materiál, ze kterého se válcují kroužky, a u nich je zpravidla nutné počítat s kalibrací. Omezení ovality napomáhá rovněž správné nastavení vodícího válečku (Obr. 33).



Obr. 33 – Nastavení vodícího válce omezující vznik ovality

Pokud se nepoužívá vodící váleček, leží střed vnějšího válce, střed vnitřního válce a střed válcovaného kroužku na jedné přímce. Při válcování větších kroužků se používají válcovačky se dvěma vodícími válečky. Je na ně třeba vyvozovat dostatečný tlak, aby se potlačila ovalita.

Největší nebezpečí výskytu geometrických vad je u tenkostěnných kroužků. Vysoké kroužky mohou mít zřetelnou kuželovitost (Obr. 32 b), která může mít několik příčin. Může být zaviněna špatnou geometrií předkovku. Děrovaný předkovek má totiž dole poněkud větší průměr než nahoře. Kuželovitost může být způsobena i nízkou tuhostí válcovačky. Při válcování menších tloušťek jsou potřebné větší tlaky, které mohou vyvolat deformaci rámu stroje, průhyb osy válců apod. Konečně může být kuželovitost vyvolána velkým úběrem na axiálních (kuželových) válcích. Tento mechanismus je vysvětlen na (Obr. 34).



Obr. 34 – Síly působící na kuželových válcích [9]

Na válcích pro axiální úběr vzniká tvářecí síla F , jelikož však současně dochází k růstu průměru kroužku, působí zde třecí síla F_t . Pokud má stěna kroužku velmi štíhlý průřez, pak vlivem síly F zde působí tendence ke zkosení, což v tomto případě znamená kuželovitost. Protože nejsou na horní a dolní ploše stejné třecí podmínky, poněvadž z dolní plochy lépe odpadávají okraje, nejsou třecí síly F_t stejné, což opět vede ke vzniku kuželovitosti. Aby se potlačil tento jev, je třeba dodržet výše uvedenou zásadu, že při válcování tenkých vysokých kroužků je třeba pracovat z počátku s minimálním axiálním úběrem, teprve ke konci válcování jej lze zvyšovat.

Nepříjemnou vadou tenkých vysokých kroužků je křížová ovalita (Obr. 32 c), při níž jsou oválné obě základny, avšak delší osy oválů jsou k sobě přibližně kolmé. Většinou tato vada vzniká při tepelném zpracování, když je kroužek nedostatečně podložen nebo je nerovnoměrně ohříván, na některé místo šlehá plamen a jiné je zastíněno. Křížová ovalita se velmi obtížně odstraňuje kalibrací.

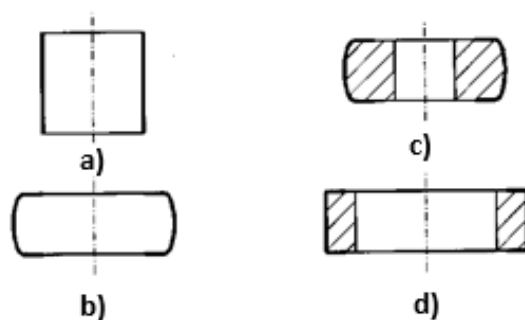
Přeložky (Obr. 32 d) se u válcovaných kroužků vyskytují jen vzácně. Většinou jsou způsobeny špatnou geometrií výchozího polotovaru, například výraznou nerovností vnitřního povrchu, jak je ukázáno v dolní části (Obr. 32 d), kdy na vnitřní ploše vzniklo při prostřihování jakési místní osazení. Z těchto důvodů jsme je zařadili mezi vady geometrie.

Nezaplněné rohy (Obr. 32 e) vznikají hlavně při válcování složitějších profilů. K zaplnění tvaru je třeba mít vhodný předkovek a dostatečný úběr. Negativně též působí zdržení při kování předkovku, které vede k poklesu teploty. Více se ochladí hrany, a tím je ztíženo zaplnění kalibru.

Kroužky malého průřezu vzhledem k tloušťce se mohou při manipulaci či tepelném zpracování prohnout (Obr. 32 f).

U tenkých plochých kroužků může dojít ke zkosení průřezu (Obr. 32 g), což může být opět způsobeno nesprávně voleným předkovkem. To znamená, že při válcování plochých kroužků je třeba nejdříve intenzivně ubírat tloušťku a teprve na konci válcování se dělá poměrně malý úběr v axiálním směru.

Další skupinu vad tvoří povrchové vady, které se zpravidla na kroužek přenášejí z povrchu výchozího polotovaru. Povrch výchozího ingotu nebo kontislitku může mít různé vady metalurgického původu. Povrchové vady mohou také vzniknout při dělení tyčí pálením, které se však praktikuje spíše výjimečně. Při zkoumání povrchových vad je třeba mít na paměti, že při petchování výchozího špalku přechází boční povrch na základny, jak ukazuje (Obr. 35). Jestliže se vyskytují vady na čelech válcovaných kroužků, mohly se tam dostat z povrchu ingotu či kontislitku.



Obr. 35 - Postup výroby válcovaného kroužku s vyznačením přechodu bočního povrchu na základny při petchování: a) výchozí špalek, b) petchování, c) děrování, d) válcování

U kroužků velkých průřezů z ložiskových ocelí se vyskytují i vnitřní vady a vady struktury. Jejich odstranění je nutné řešit individuálně. Někdy se používá difúzní žhánání, jindy se prokovávají výchozí špalky.

5 Experimentální stanovení struktury a vlastností kroužků

Tabulka 4 Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli

Materiál	42CrMo4						
Chemické složení	C	Si	Mn	P max	S max	Cr	Mo
	0,38-0,45	0,4	0,6-0,9	0,035	0,035	0,9-1,20	0,15-0,3
Mechanické vlastnosti	Mez kluzu [MPa]		Mez pevnosti [MPa]		A [%]	Z [%]	KV [J]
	650		950-1100		12	50	35

5.1 Rozbor vady v kroužku vyrobeného z oceli 42CrMo4

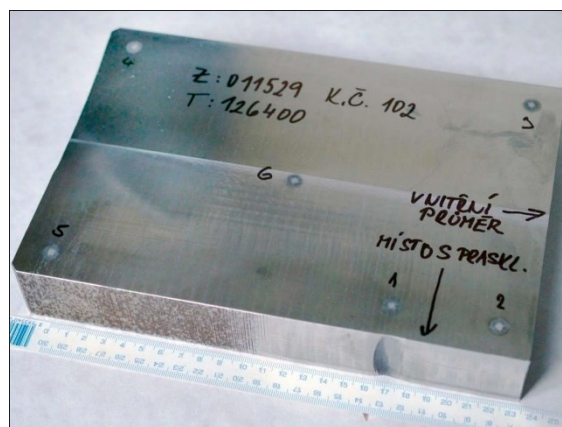
5.1.1 Zadání a vstupní údaje

Cílem experimentu bylo posoudit charakter vady v dodaném fragmentu odebraném z kroužku s označením kus č. 102, vyrobeného z oceli 42CrMo4. Poloha vady – trhliny byla šipkou označena na povrchu vzorku. Okolnosti vzniku vady a výrobní proces kroužku nebyly specifikovány.

Z dodaného segmentu byl v místě vady vyříznut hranol, který byl trojosým ohybem při pokojové teplotě rozlomen tak, aby byl povrch vady zpřístupněn k přímému pozorování. To bylo provedeno pomocí stereolupy (SL) a řádkovacího elektronového mikroskopu. Jedna rozlomená část byla (vůči trhlíně) příčnými řezy rozdělena na menší vzorky. Jeden z řezů byl veden v místě předpokládané iniciace. Na tomto řezu (tj. v rovině kolmé k trhlíně) byl zhotoven metalografický výbrus, u něhož byla sledována mikrostruktura pomocí světelného mikroskopu.

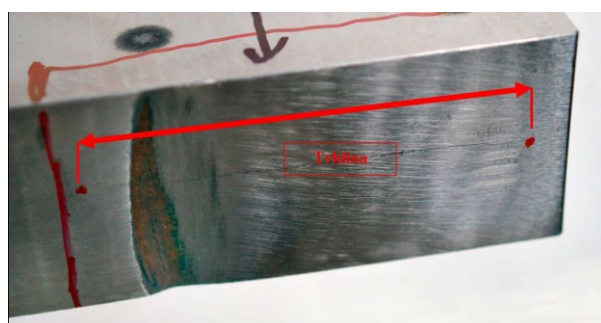
5.1.2 Výsledky

Pohled na dodaný vzorek s vyznačením polohy vady (černá šipka) je na (Obr. 36).



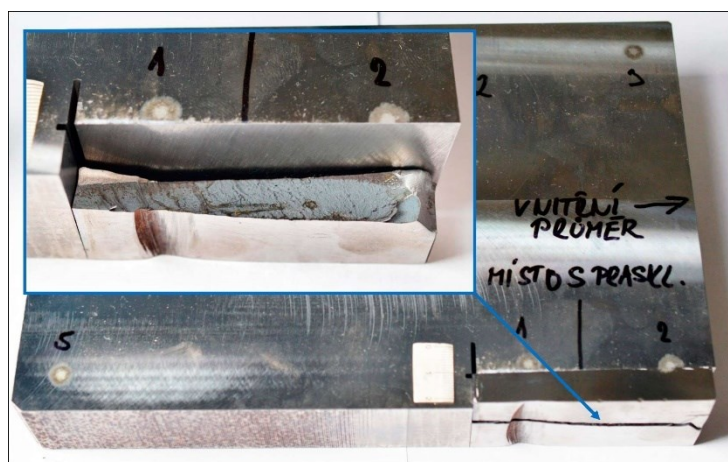
Obr. 36 – Dodaný vzorek

Vada je tvořena trhlinou o délce asi 90 mm, která se nachází na povrchu kroužku poblíž jeho vnitřního průměru, od kterého měl bližší konce trhliny vzdálenost asi 8 mm. V místě trhliny byla část povrchové vrstvy napříč odbroušena do hloubky asi 2 mm (Obr. 37).



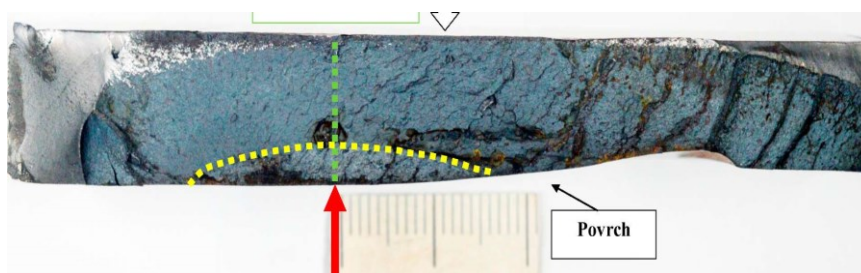
Obr. 37 – Detail oblasti výskytu trhliny

Obrázek 38 ukazuje dodaný fragment po vyříznutí hranolu, jeho rozlomení a zpětném dosazení do původní polohy. Na vloženém snímku je zachycena situace po vložení pouze jedné poloviny hranolu.



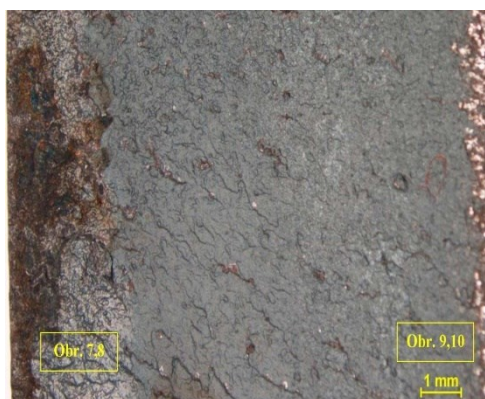
Obr. 38 – Vzorek po rozlomení trhliny

Lomové plochy trhliny na rozlomeném hranolu jsou zachyceny na (Obr. 39).

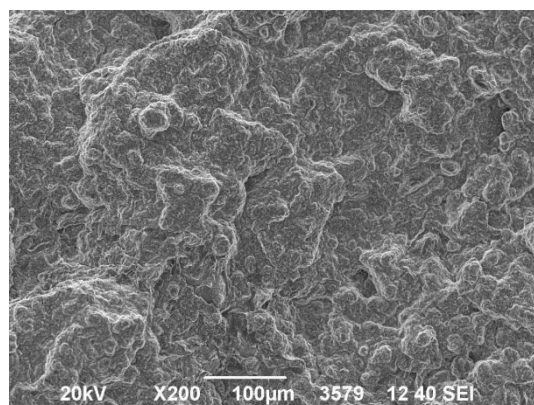


Obr. 39 – Lomová plocha

Trhlina má nesymetrický poloeliptický tvar a zasahuje do hloubky asi 15 mm (část trhliny byla prořazena vydávajícím řezem a na rozlomeném vzorku chybí). Trhlina je zhruba kolmá k povrchu dílu a na koncích je lukovitě prohnutá. Toto prohnutí je výraznější u konce trhliny ležícího u středu podstavy kroužku. Při obou bočních stranách trhliny jsou výrazné schodovité stupně vzniklé propojením paralelně se šířících trhlinek iniciovaných ve výškově mírně odlišných polohách. Povrch trhliny je jemného vzhledu a je pokryt vrstvou oxidů. Na lomové ploše lze podle stupně oxidace povrchu rozlišit dvě fáze šíření trhliny. V první fázi vznikla trhlina nesymetrického poloeliptického tvaru o délce asi 25 mm a maximální hloubce průniku 3 mm. Iniciována byla z povrchu podstavy dílu a je pokryta silnější krustou světle šedomodrých oxidů. Na (Obr. 39) je ohraničena žlutou čárkovanou čarou. Zbývající část lomové plochy vytvořená ve druhé fázi šíření je zoxidována méně a oxidy mají tmavší odstín. (Obr. 40) ukazuje část lomové plochy zhruba uprostřed délky trhliny.



a)

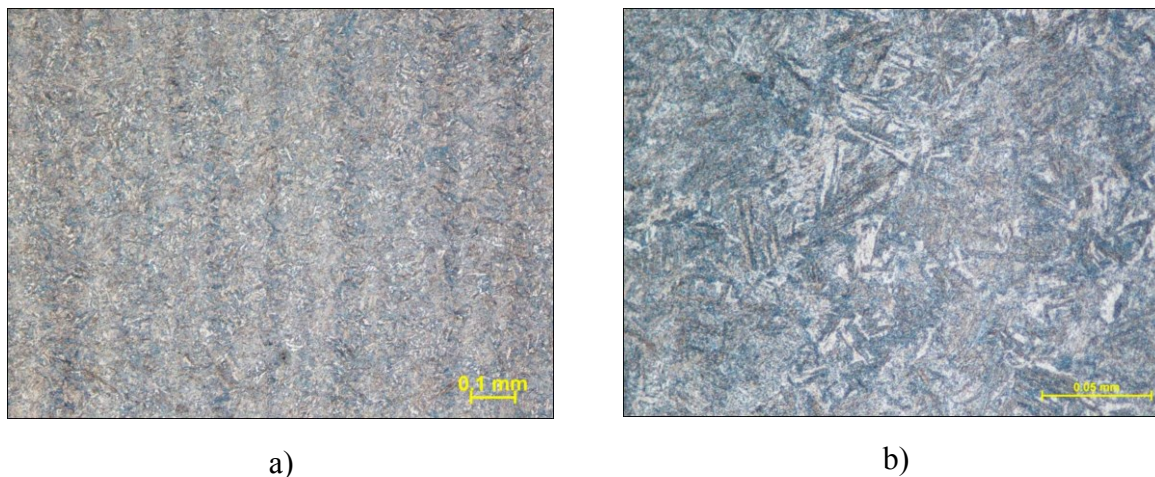


b)

Obr. 40 – Povrch lomové vzorku: a) zvětšení x 10, b) zvětšení x 200

Povrch časněji vytvořené lomové plochy s vyšším stupněm oxidace je v levé části snímku. Krusta oxidů na lomové ploše vytvořené v první fázi je dokumentována na (Obr. 40) vlevo, druhé fáze, na obrázku vpravo.

Mikrostruktura oceli je tvořena jemným heterogenním bainitem (Obr. 41). Hranice původních austenitických zrn nebyly nijak výrazně naleptány.



Obr. 41 – Mikrostruktura vzorku v blízkosti trhliny: a) zvětšení x 100, b) zvětšení x 500

5.1.3 Závěr

Vada v dodaném fragmentu z kroužku je tvořena trhlinou vniklou vlivem napětí v kroužku (délka trhliny cca 90 mm) a zasahující do hloubky 8 mm pod povrch. Nachází se na vnějším povrchu podstavy kroužku a byla iniciována z povrchu. Vznikla ve dvou časových údobích. V prvním se rozvinula do délky asi 25 mm a hloubky asi 3 mm. V tomto stavu prodělala teplotní expozici a došlo k oxidaci jejího povrchu. Ve druhé fázi se rozšířila do stávajících rozměrů a intenzita oxidace za tepla byla nižší. V závěrečných fázích se trhlina šířila převážně interkrystalicky, tedy defektním lomem, a toto lze předpokládat i pro celou dobu šíření. Vznik trhliny byl tedy výrazně podpořen zkřehnutím hranic původních austenitických zrn. Snížená koheze hranic zrn může být vyvolána segregací fosforu a stopových prvků (Sn, Sb, Bi) při určitých teplotních režimech. Relativně slabá tloušťka oxidické vrstvy svědčí o tom, že ke vzniku trhliny došlo ve finální fázi tepelného zpracování, resp. během chladnutí kroužku po něm. Mikrostruktura materiálu je tvořena jemným bainitem s nevýraznou pásovou strukturou.

5.2 Rozbor vady v ingotu pro výrobu kroužků

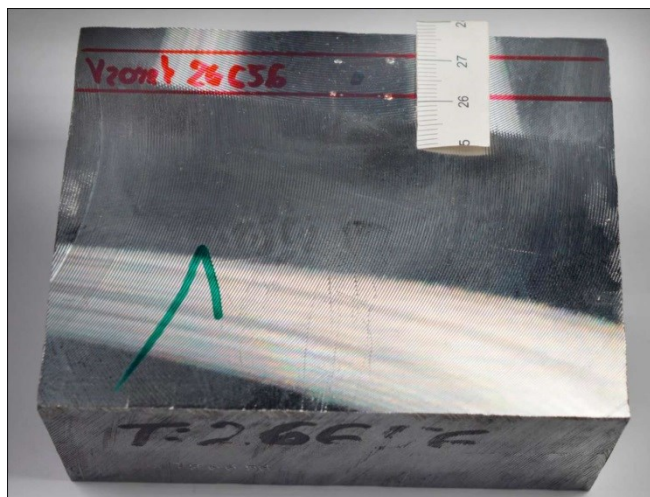
5.2.1 Zadání a vstupní údaje

Metalograficky byl proveden rozbor příčin vzniku vady nalezené při UZ defektoskopické kontrole v ingotu určeného pro výrobu kroužků. Z ingotu byl vyříznutý vzorek z oblasti výskytu indikace, na jehož jednom vydělovacím řezu byla poloha vady vyznačena stopami důlčíku.

Po dodání vzorku byla provedena magnetická zkouška, aby byla vada dohledána a určena její orientace. Z dodaného materiálu byl vyříznut vzorek obsahující vadu, který byl rozlomen trojosým ohybem za pokojové teploty tak, aby bylo možné obnažený povrch vad přímo prohlédnout. Pozorování bylo provedeno pomocí binokulární lupy a řádkovacího elektronového mikroskopu (ŘEM). Analýza prvkového složení byla provedena pomocí ED mikroanalýzy.

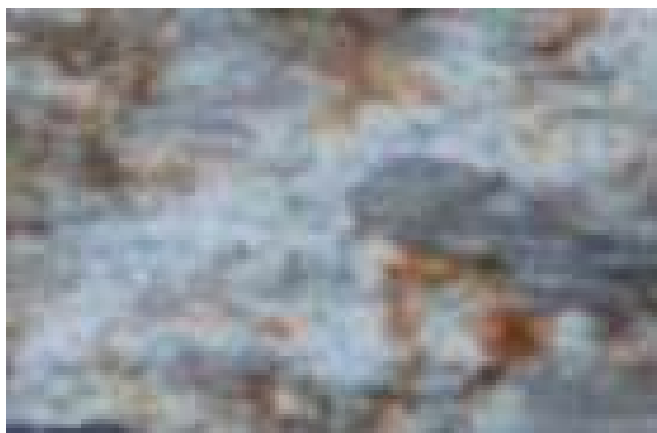
5.2.2 Výsledky

Pohled na dodaný fragment je na (Obr. 42), oblast nalezené indikace je na snímku označena zelenou čarou mezi stopami důlčíku a je rovněž vyznačena poloha vzorku určeného pro rozlomení.



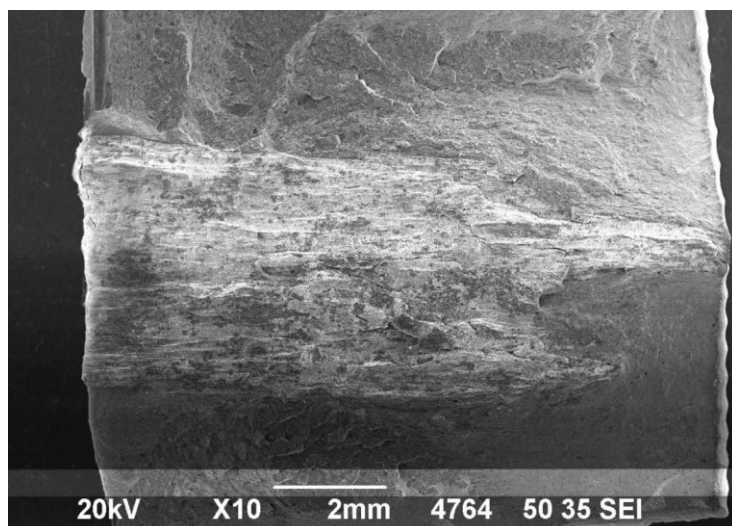
Obr. 42 – Dodaný vzorek

Lomová plocha rozlomeného vzorku je zachycena na (Obr. 43) pořízeném pomocí BL. Na lomové ploše je patrná vada tvořená necelistvostí o celkové délce asi 10 mm o šířce asi 4 mm; velké část vady však byla při dohledávání odstraněna. Plocha tvořící povrch vady je mírně zvlněná a téměř souvisle pokrytá částicemi nekovové hmoty bílé barvy (Obr. 43). Povrch je částečně zkorodovaný.

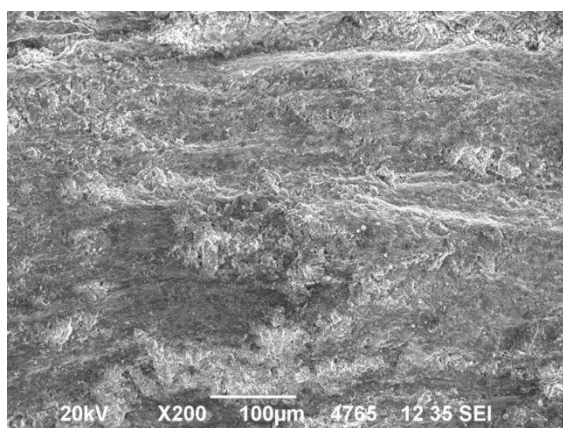


Obr. 43 – Plocha rozlomeného vzorku

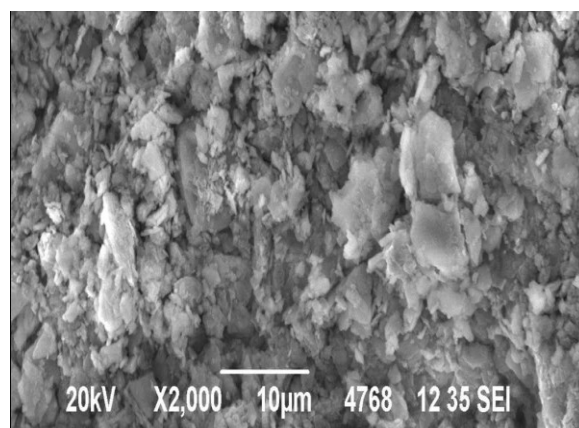
Pohled na vadu pořízený pomocí ŘEM je dokumentován na (Obr. 44), detailněji pak na (Obr. 45).



Obr. 44 – Lomová plocha na vzorku



a)



b)

Obr. 45 – Detil lomové plochy vzorku: a) zvětšeno 200 x, b) zvětšeno 2000 x

Z obrázků je vidět, že nekovová hmota je tvořená částicemi nepravidelného tvaru o velikosti od několika jednotek mikrometru do 10 µm (Obr. 45 b). Výsledky ED mikroanalýzy z částic jsou uvedeny v (Tab. 5 a) a po eliminaci chromu a železa, jejichž signál pocházel z materiálu ingotu (ležícího pod nekovovou hmotou), v (Tab. 5 b). Ta dává lepší představu o skutečném složení nekovové hmoty.

Tabulka 5a Prvkové složení v hmotnostních %

Spectrum	O	Mg	Al	Ca	Ti	Fe
Spectrum 1	33,9	2,4	40,9	6,0	0,0	16,9
Spectrum 2	35,0	2,1	45,8	5,8	0,2	11,1
Spectrum 3	38,0	3,6	45,8	5,7	0,3	6,6
Spectrum 4	36,6	2,9	45,4	5,4	0,4	9,3

Spectrum 5	39,6	3,0	46,7	6,4	0,3	4,0
---	---	---	---	---	---	---
Mean	36,6	2,8	44,9	5,9	0,2	9,6
St. dev.	2,0	0,5	2,1	0,3	0,1	4,4
Max.	39,6	3,6	46,7	6,4	0,4	16,9
Min.	33,9	2,1	40,9	5,4	0,0	4,0

Tabulka 5b Prvkové složení v hmotnostních %

Spectrum	O	Mg	Al	Ca	Ti
Spectrum 1	45,1	2,4	44,8	7,6	0,0
Spectrum 2	42,3	2,1	48,5	6,8	0,3
Spectrum 3	42,4	3,6	47,5	6,3	0,3
Spectrum 4	42,7	3,0	47,7	6,2	0,4
Spectrum 5	42,3	3,0	47,6	6,8	0,3
---	---	---	---	---	---
Mean	43,0	2,8	47,2	6,7	0,3
St. dev.	1,1	0,5	1,2	0,5	0,1
Max.	45,1	3,6	48,5	7,6	0,4
Min.	42,3	2,1	44,8	6,2	0,0

Nekovová hmota je tvořena oxidy na bázi hliníku, vápníku a hořčíku s menším podílem titanu.

5.2.3 Závěr

Příčinou indikace při UZ kontrole ingotu určeného pro výrobu kroužků byla přítomnost exogenních vměstků resp. práškové nekovové hmoty vyplňující necelistvosti v kovové matici. Hmota je tvořena komplexními oxidy na bázi hliníku, vápníku, hořčíku s menším podílem titanu. Tvářením budou částice uspořádány do plošného útvaru. Zřejmě se jedná o zbytky dezoxidačního činidla.

5.3 Metalografický rozbor příčiny porušení válcovaného kroužku

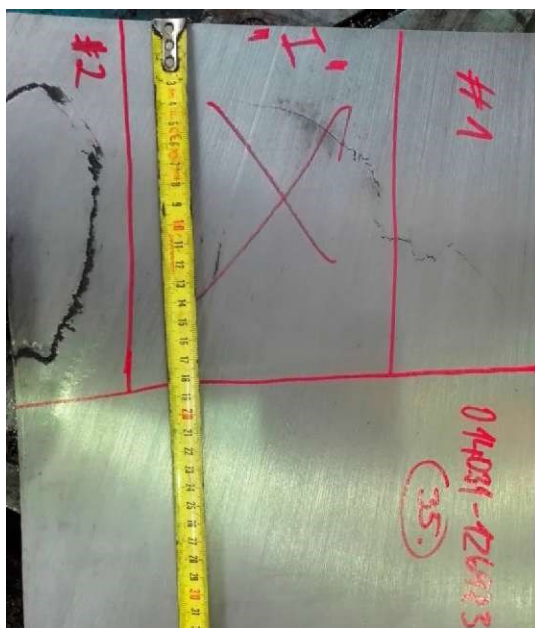
5.3.1 Základní a vstupní údaje

Byl proveden rozbor 2 vzorků odebraných z válcovaného kroužku s necelistvostmi. Rozměry válcovaného kroužku: ϕ 2880/ ϕ 2150 x 290 mm. Válcovaný kroužek byl vyroben z kruhového ingotu o průměru 1000 mm, z oceli 42CrMo4. Necelistvosti byly v kroužku

objevy při vizuální kontrole po TZ (kalení + popouštění). Vada byla viditelná podél celého obvodu kroužku (vnitřní průměr, obě čela, venkovní průměr). Z kroužku byl odříznutý příčný segment v místě vady. Po rozříznutí byly identifikovány dva vizuálně odlišné defekty, které byly pracovně označeny #1 a #2 (Obr. 46). Dále byl rovněž odebrán vzorek s rozevřenou trhlinou.

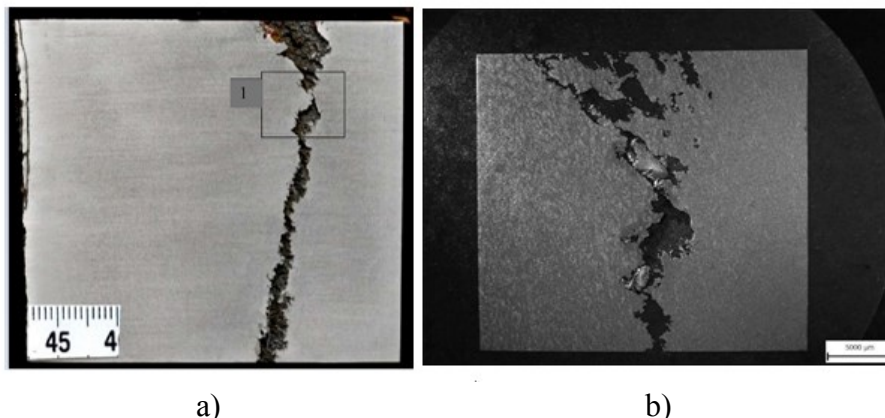
5.3.2 Výsledky

Metalografický rozbor byl zaměřený na: makrostrukturu v oblastech #1 a #2 dokumentace naleptaných makrostruktur, SEM analýzu povrchu trhliny – rozlomený vzorek, mikrostrukturu ve vybraných oblastech, metalografický rozbor materiálu v okolí vad.



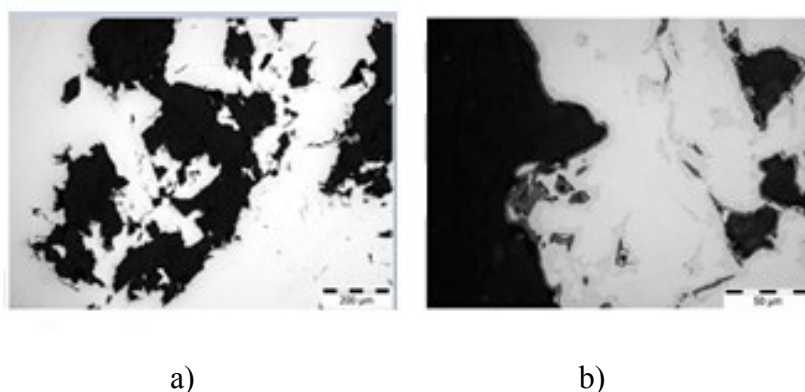
Obr. 46 - Příčný segment s vyznačenými defektními oblastmi #1 a #2

Ze získaných vzorků s označením #1 a #2 byly zhotoveny výbrusy pro makrostrukturní rozbor. Na základě výsledků makrostrukturního rozboru byly vybrány tři vzorky pro mikrostrukturní rozbor, které byly označeny 1, 2 a 3. Vzorek s rozevřenou trhlinou vykazoval na lomové ploše 2 kontrasty: tmavý a hnědý kontrast. Studium topografie lomové plochy bylo provedeno v oblasti s tmavým kontrastem. Metalografické studium bylo provedeno na příčných řezech (kolmo na lomovou plochu) odebraných jak v oblasti s tmavým, tak i s hnědým kontrastem – vzorky 4a a 4b.

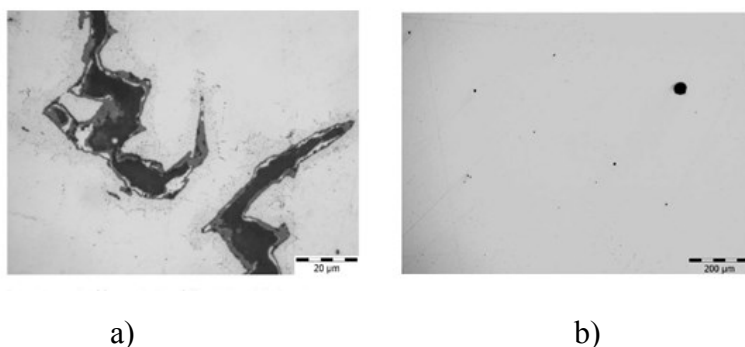


Obr. 47 – a) makrostruktura v oblasti vady #2, vzorek 1; b) makrostruktura vzorek 1

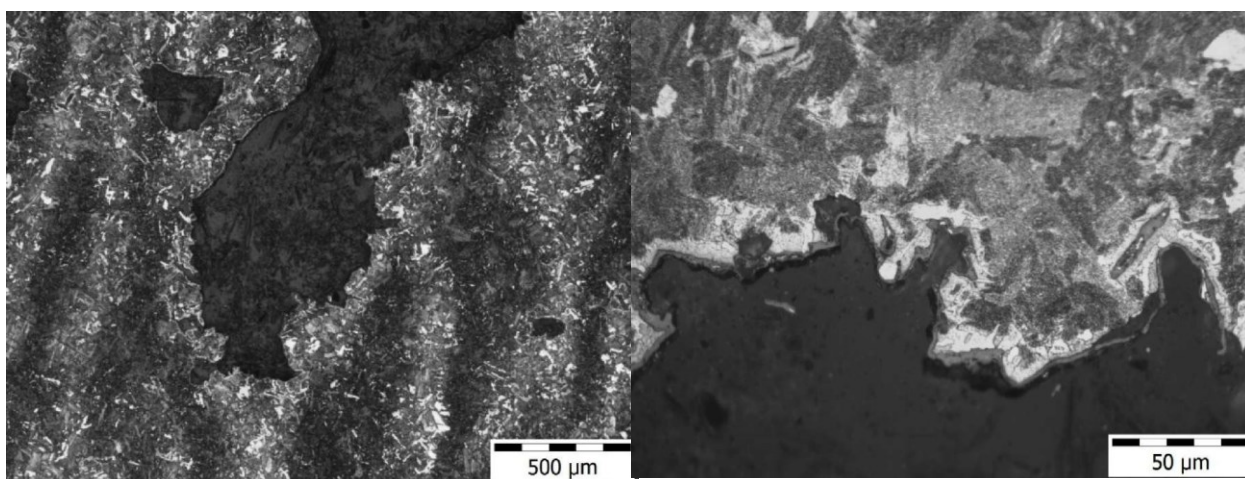
Na (Obr. 47 a) je dokumentován makrolept oblasti #2. Makrostruktura je rovnoměrná, přes celou výšku vzorku se šíří trhlina částečně vyplněná okujemi. Metalurgické defekty v okolí trhliny pozorovány nebyly. Pro účely mikrostrukturního rozboru byl odebrán vzorek 1, (Obr. 47 b). Ve vzorku se vyskytovaly rozměrné dutiny a natrženiny (povrch vzorku byl orientován téměř tečně k trhlině), které byly částečně vyplněny okujemi a v okolí těchto defektů bylo v matici pozorováno jemné síťoví oxidických vměstků (interní oxidace), (Obr. 48 - 50). Výskyt ocelářských nekovových vměstků oxidického typu v okolí defektů nebyl významný. Typická distribuce oxidů v kovové matici je dokumentována na (Obr. 51). Mikrostruktura v okolí vad byla významně odlišná. Mikrostruktura základní matrice byla převážně bainitická, v segregačních pásech byla mikrostruktura prokalenější s výskytem martenzitické složky (Obr. 52). V důsledku aplikovaného popouštění byla základní mikrostruktura popouštěná. Výrazné oduhličení matrice podél vad pozorováno nebylo, což svědčí o tom, že tyto vady neměly kontakt s pecní atmosférou během austenitizace. Vady byly lemovány tenkou, částečně oduhličenou vrstvou, ve které se vyskytovalo jemné síťoví oxidů vzniklých mechanismem vnitřní oxidace (Obr. 53-54). K těmto jevům došlo v průběhu popouštění.



Obr. 48 – a) dutiny a natrženiny v defektní oblasti vzorku 1,
Obr. 49 – b) Interní oxidace matrice v okolí vad ve vzorku 1



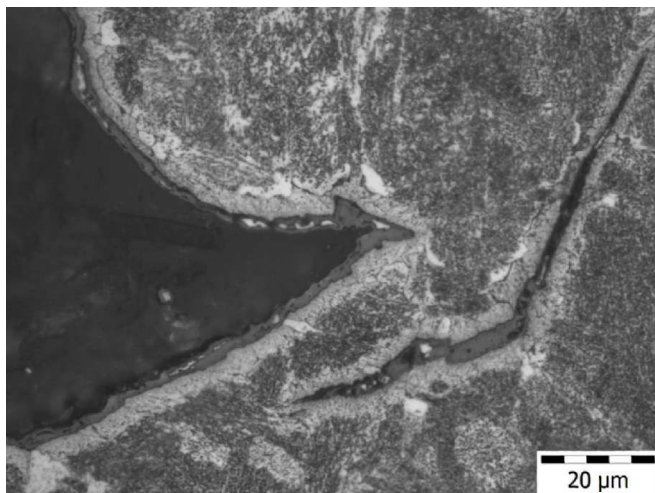
Obr. 50 – a) interní oxidace v okolí vad částečně vyplněných okují, vzorek 1
Obr. 51 – b) typická distribuce nekovových vměstků, vzorek 1



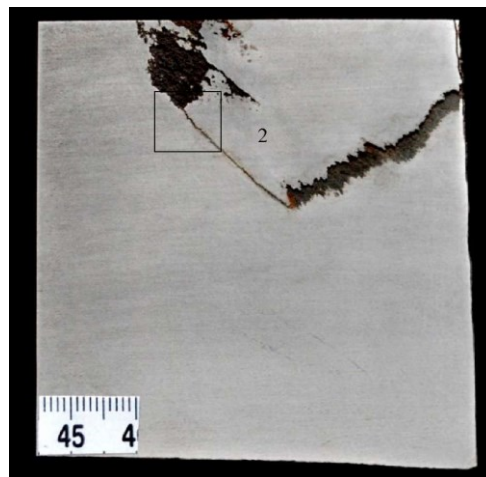
Obr. 52 – mikrostruktura v okovli vad, vzorek 1

Obr. 53 – okuje na povrchu vady a částečně oduhličena matrice, vzorek 1

Makrostruktura odřezku, který byl rovněž odebrán z oblasti vady #2, je dokumentována na (Obr. 55). Makrostruktura je rovnoměrná, bez výskytu metalurgických vad v okolí necelistvosti. Na (Obr. 55) je rovněž vyznačena poloha vzorku, na kterém bylo provedeno mikrostrukturní šetření (Obr 56). Šířka necelistvostí na metalografickém řezu byla ovlivněna malým úhlem mezi povrchem výbrusu a rovinou trhliny (Obr 57). Obdobně jako v případě vzorku 1, byly dutiny a natrženiny částečně vyplněny okují a v okolí defektů se vyskytovala úzká pásma interní oxidace, (Obr. 58-59). Mikrostruktura v okolí vad je dokumentována na (Obr. 60). V bezprostředním okolí vad se vyskytovala pouze úzká pásma částečného oduhličení, kterých se vyskytovaly produkty interní oxidace, (Obr. 61-63). Charakter trhlin na (Obr. 62-64) nasvědčuje, že tyto defekty představují natrženiny podél hranic původních austenitických zrn.



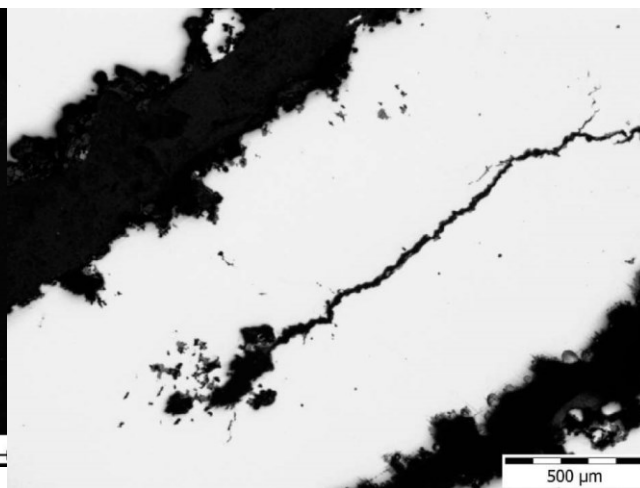
Obr. 54 – detail okují na povrchu vad a částečně oduhličené vrstvy, vzorek 1



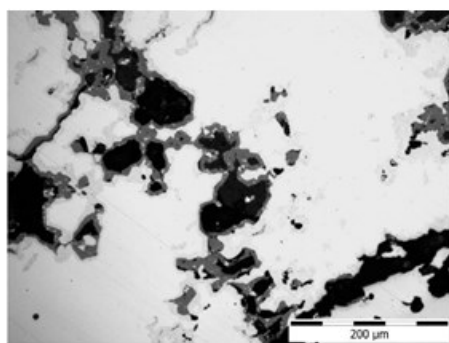
Obr. 55 – makrostruktura v oblasti vady #2, vzorek 2



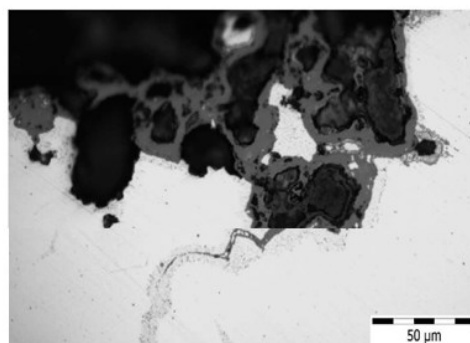
Obr. 56 – mikrostruktura vzorku 2



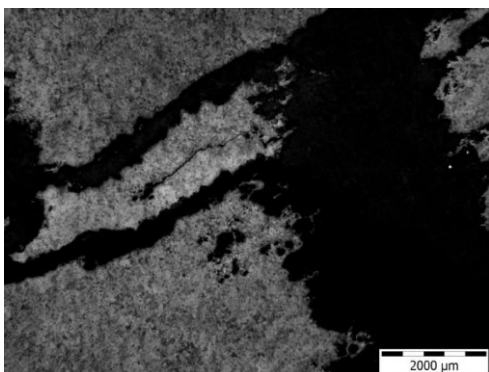
Obr. 57 – dutiny a natrženiny v defektní oblasti vzorku 2



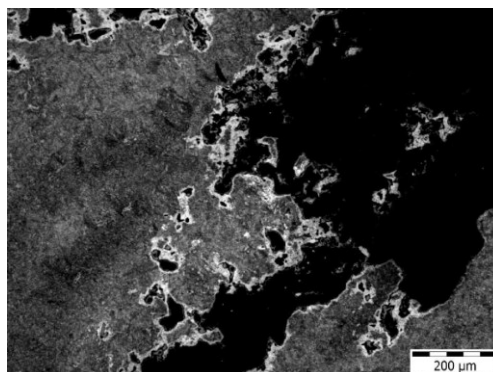
Obr. 58 – dutiny částečně vyplněné okují a inerní oxidace matrice, vzorek 2



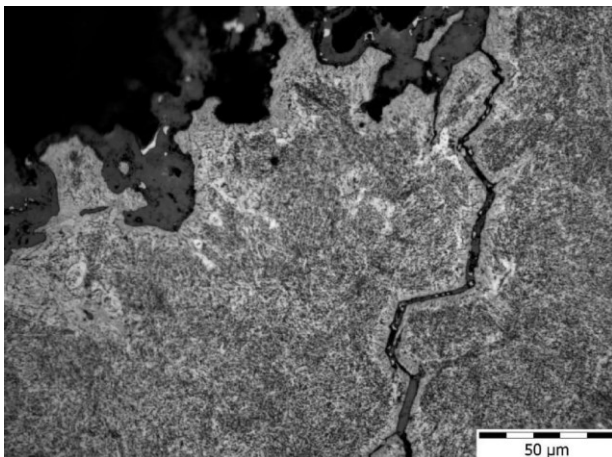
Obr. 59 – detail interní oxidace v okolí vad, vzorek 2



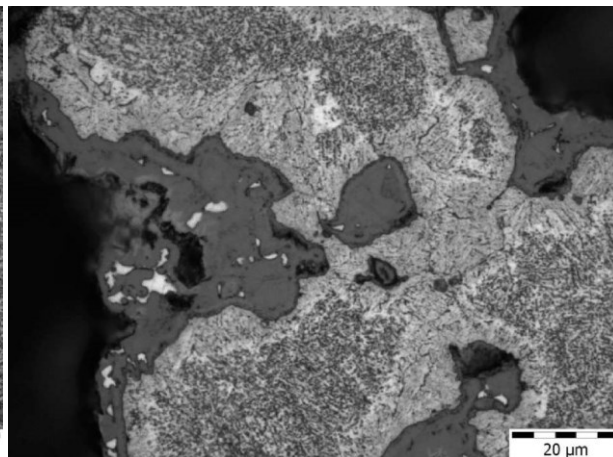
*Obr. 60 – mikrostruktura v okolí vad,
vzorek 2*



*Obr. 61 – částečné oduhličení pod povrchem
vad, vzorek 2*

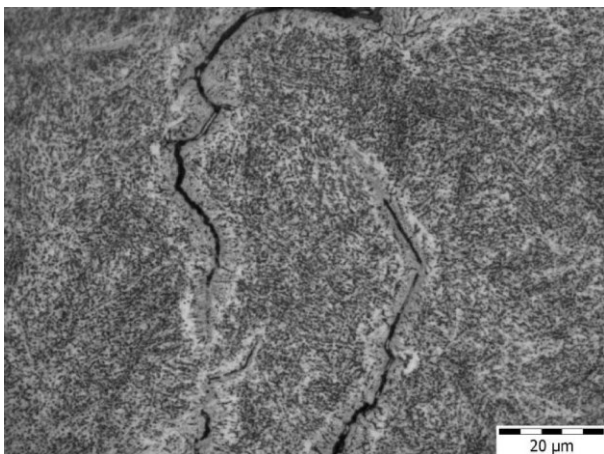


Obr. 62 – detail částečného oduhličení v okolí vad vyplněných okují, vzorek 2

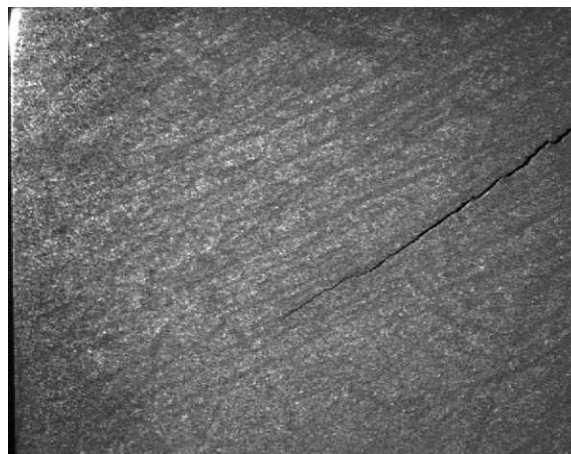


Obr. 63 – detail okují a částečného oduhličení v okolí vad, vzorek 2

Na (Obr. 65) je dokumentována makrostruktura v oblasti vady #1. Vzorek pro mikrostrukturní šetření byl odebrán v oblasti kořene trhliny (Obr. 65). Detail makroleptu na (Obr. 66) dokumentuje, že trhlina se šířila ve směru usměrnění struktury během tváření. V oblasti kořene trhliny se vyskytovala pásma interní oxidace, mikrostruktura v těsném okolí trhliny byla částečně oduhličená (Obr. 67). To znamená, že během popouštění pecní atmosféra pronikla až do oblasti kořene. V okolí trhliny nebyly pozorovány žádné metalurgické defekty



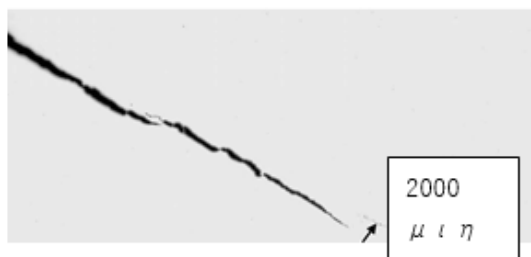
Obr. 64 – detail částečného oduhličení v okolí trhlín, vzorek 2



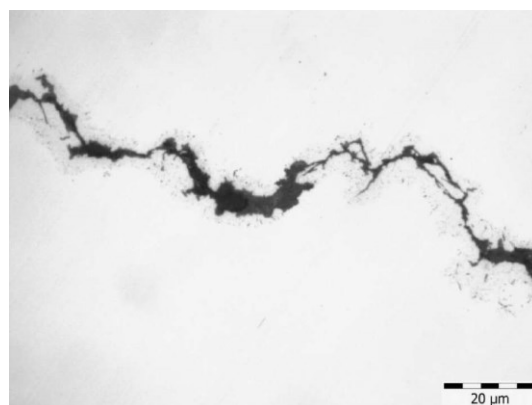
Obr. 65 – struktura vzorku s trhlinou



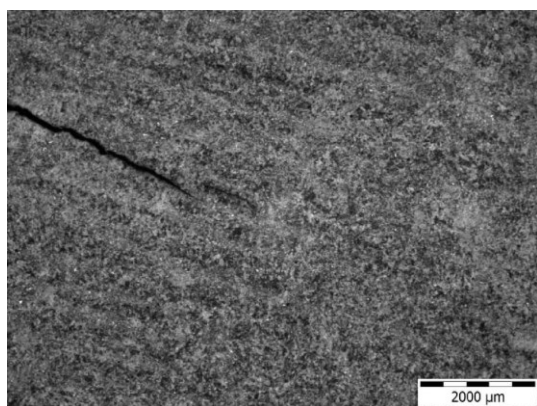
Obr. 66 mikrostruktura vzorku 3



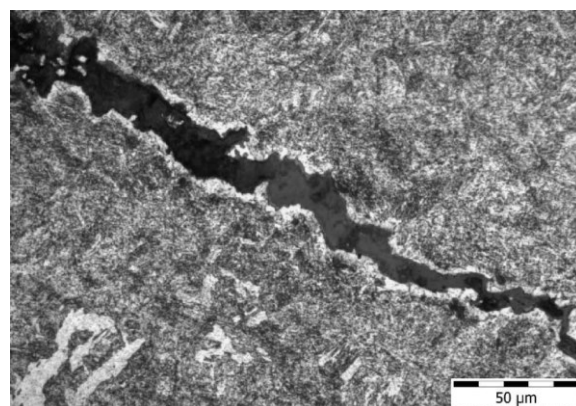
Obr. 67 – interní oxidace matrice v okolí kořene trhliny, vzorek 3



Obr. 68 – detail interní oxidace v oblasti označení šipkou v (Obr. 67), vzorek 3



Obr. 69 – mikrostruktura v okolí trhliny, vzorek 3



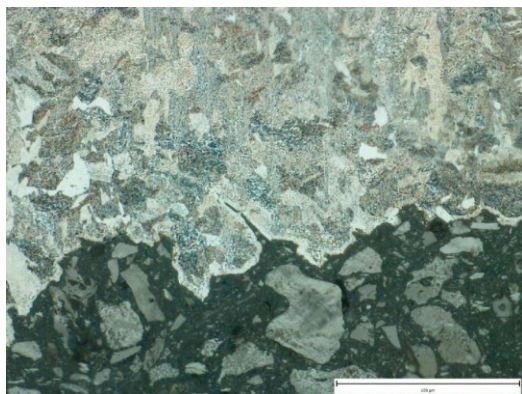
Obr. 70 – částečné oduhličení v blízkosti krátké trhliny na (Obr.24), vzorek 3



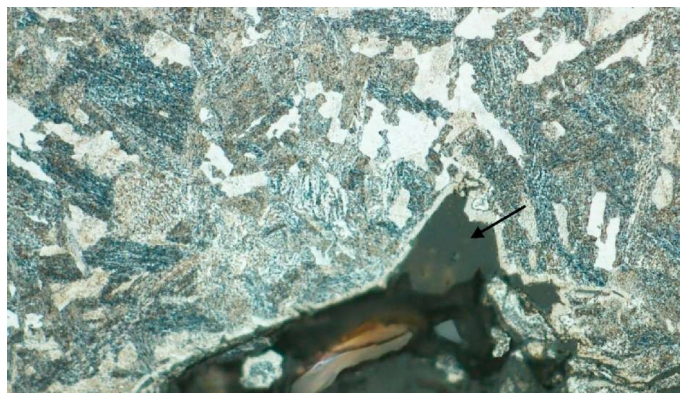
Obr. 71 – dva kontrasty na povrchu otevřené trhliny, vzorek 4

Na (Obr. 71) je dokumentována rozevřená trhлина, lomová plocha vykazuje dva kontrasty. Pro studium topografie lomové plochy byly připraveny výbrusy přibližně kolmé k povrchu lomu jednak v oblasti s tmavým kontrastem lomové plochy a jednak v oblasti s hnědým zabarvením lomové plochy.

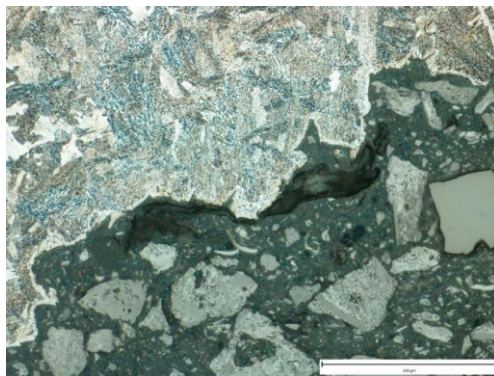
Na (Obr. 72-74) je uvedena lomová čára v oblasti s tmavým kontrastem lomu. Lomová čára je značně nerovná, z lomové čáry často vybíhají krátké pobočné trhliny. Průběh lomové čáry nasvědčuje, že se jedná o porušení podél hranic původních austenitických zrn. Obdobně jako u předchozích vzorků byla matrice podél lomové čáry částečně oduhličena (Obr. 74). Na lomové ploše byly zjištěny částice organické hmoty, která obsahovala převážně uhlík a kyslík (Obr. 73).



Obr. 72 – lomová čára v oblasti lomové plochy s tmavým kontrastem na (Obr. 71). vzorek 4a

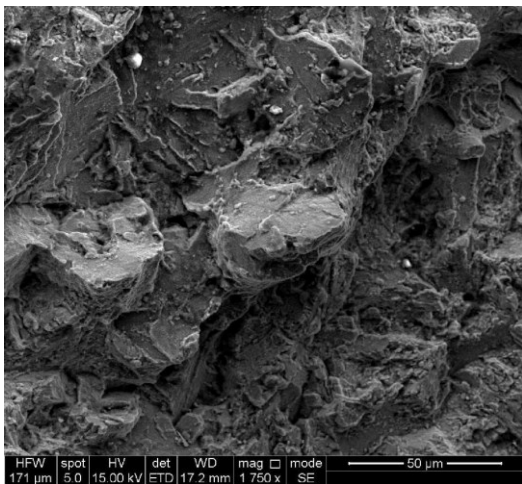


Obr. 73 – lomová čára v oblasti lomové plochy s tmavým kontrastem na (Obr. 71), šipka označuje útvar organické hmoty, vzorek 4a

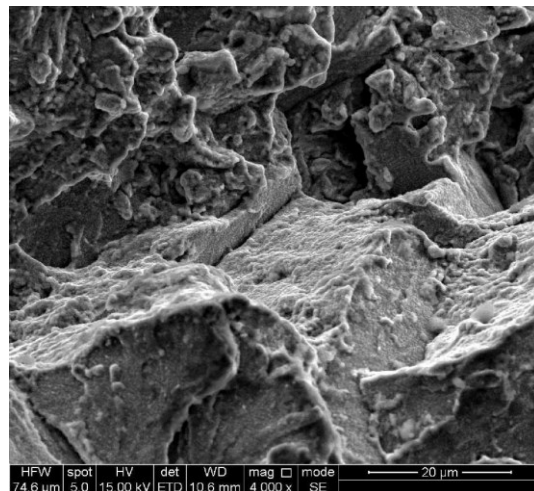


Obr. 74 – lomová čára v oblasti lomové plochy s tmavým kontrastem na (Obr. 71), částečné oduhličení pod povrchem lomu, vzorek 4a

Na (Obr. 75-76) je na zobrazeních v sekundárních elektronech dokumentována topografie lomové plochy v oblasti s tmavým kontrastem lomu (vzorek 4a). Lomová plocha je převážně tvořena hrubými interkrystalickými fazetami s lokálním výskytem krátkých, vedlejších trhlin.

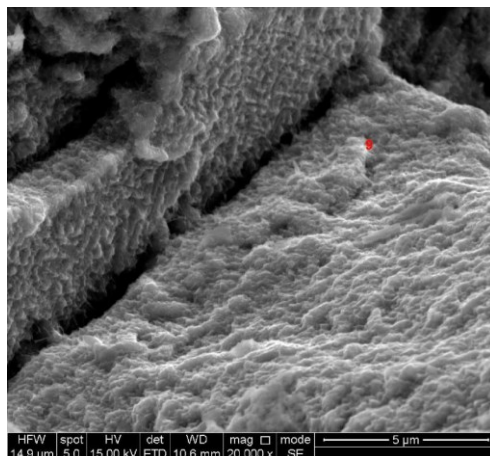


Obr. 75 – topografie lomové plochy



Obr. 76 – topografie lomové plochy, zobrazení vzorek 4a

Na lomové ploše byla za použití EDX mikroanalýzy lokálně prokázána přítomnost tenké vrstvy oxidů na bázi železa (Obr. 77).



Obr. 77 – interkrystalický lom pokrytý oxidem železa, vzorek 4a

5.3.3 Závěr

Vady ve zkoumaných vzorcích lze charakterizovat jako kalící trhliny šířící se převážně podél hranic zrn původního austenitu. Pravděpodobným iniciačním mechanismem byla úroveň vnitřních napětí generovaných během kalení. Na zkoumaných vzorcích nebyla prokázána žádná souvislost mezi těmito vadami a případnými metalurgickými defekty.

V okolí těchto vad bylo zjištěno pouze nevýrazné oduhličení, což je možné považovat za důkaz, že tyto defekty se v kroužku nevyskytovaly během prvního kroku tepelného zpracování na jakost (austenitizace před kalením). K nevýraznému oduhličení okolí vad, včetně tvorby jemných oxidů (interní oxidace), došlo během popouštění.

Na povrchu lomu, který vykazoval tmavý kontrast (šířka cca 20 mm), se vyskytoval nesouvislý film organické hmoty (převážně uhlík + kyslík). Původ těchto částic je nejasný – podle sdělení zadavatele programu bylo kalení provedeno do čisté vody (bez přísady polymerů). Tyto útvary samozřejmě nemohly být přítomny v dodaném ingotu – vyhořely by během ocelářského procesu.

Variabilní šířka trhlin ve vzorcích 1 a 2 (odřezek #2) souvisí s tím, že rovina řezu byla téměř tečná k přítomným defektům (trhlině).

6 Diskuse a závěr

Předkládána diplomová práce se zabývá detailním rozбором při deformaci a napětí při válcování kroužků, analýzou postupu výroby válcovaných kroužků ve společnosti Brück AM. Dále vlivem postupu výroby kroužku na vznik povrchových a vnitřních vad. V diplomové práci je dále provedeno experimentální stanovení struktury a vlastností kroužků válcovaných z oceli 42CrMo4. Při rozboru deformace při válcování kroužků lze deklarovat, že velikost deformace není rovnoměrná, ze strany vnitřního válce, je větší než ze strany většího válce, což rovněž vyplývá z rovnosti sil. Celkový úběr stěny kroužku je pak součtem dílčích úběrů, tj. ze strany menšího a většího válce. Vzhledem k tomu, že při válcování kroužku dochází k šíření (Rov. 2.9), je nutno pomocí axiálních válců tuto narůstající šířku upravit na finální konečnou výšku kroužku. Bylo ověřeno, že při stanovení deformační síly je nutno výpočet deformačního odporu provádět dle rovnice (Rov. 2.6)

Studiem literatury jsem dospěl k názoru, že převážný podíl válcovaných kroužků tvoří hladké kroužky. Vstupním polotovarem pro výrobu kroužku jsou ingoty nebo PLP, kde jejich zpracování na finální tvar kroužků se stává ze dvou částí, kde první část je převážně založena na operacích volného kování a druhá část na tvarování a dosažení požadovaného tvaru kroužku na technologii válcování. Technologický postup se stává v závislosti typu, tvaru vstupního polotovaru na dělení PLP a následně na jejich ohřevu (na horní kovací teplotu). Jejich pěchování, děrování a rozválcování na požadovaný tvar. Pokud je vstupním polotovarem ingot, pak technologie je komplikovanější a postup je následující: vykování z ingotu špalku, jeho ohřev na horní kovací teplotu a následující postup se shoduje s technologií výroby kroužku z PLP polotovaru.

Detailní popis technologie výroby kroužků ve společnosti Brück je popsán v (Kap. 3.4). Jako je např. výběr materiálu, měření vstupního průměru, řezání, kování a válcování. Ohřev probíhá v komorových nebo karuselových pecích. Předkování probíhá na hydraulickém lise, který disponuje silou 35 MN a na válcovacím stroji RAW 250/200 na kterém lze vyválcovat kroužky o maximálním vnějším průměru $d = 4\,000\text{ mm}$ a maximální hmotnost vyválcovaných kroužků se pohybuje kolem 7 tun. Na technologii válcování navazuje tepelné zpracování, obrábění na finální rozměry kroužku a zkoušení mechanických vlastností. Převážně se kroužky válcují z oceli 42CrMo4 jejíž chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v (Tab. 4)

Při výrobě kroužku vznikají vnitřní a vnější vady, a to jednak přenosem licích vad ze vstupních polotovarů pro výrobu kroužku a dále při nedodržení optimální technologie výroby předkovku pro válcování kroužků a vlivem vznikajících napětí při válcování, vychlazování a tepelném zpracování kroužku.

Byla provedena analýza rozboru vad u třech válcovaných kroužků. 1) Rozbor vady kroužku vyrobené z oceli 42CrMo4. Cílem bylo posoudit charakter vady. Vada byla typu trhliny, která pravděpodobně vznikla vlivem tepelných napětí kroužku. 2) Rozbor vady v ingotu pro výrobu kroužků. Byl proveden rozbor příčin vzniku vady nalezené při UZ

defektoskopické kontrole v ingotu. Příčinou indikace při UZ kontrole ingotu určeného pro výrobu kroužků byla přítomnost exogenních vměstků. 3) Metalografický rozbor příčiny porušení válcovaného kroužku. Provedl se rozbor 2 vzorků z válcovaného kroužku s necelistvostmi. Necelistvosti byly objeveny při vizuální kontrole. Vada byla viditelná podél celého obvodu kroužku. Vady ve zkoumaných vzorcích lze charakterizovat jako kalící trhliny šířící se převážně podél hranic zrn původního austenitu. Pravděpodobným počátečním mechanismem byla úroveň vnitřních napětí během kalení.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] MILUTINOVIĆ, M. et al. "Hot ring rolling in bearing production" Journal for Technology of Plasticity, Vol. 30, Number 1-2, 2005
- [2] KIM, K. J. et al. "Ring-Rolling Process for Manufacturing Ti-6Al-4V Plane and Profiled Ring-Products", Advanced Materials Research, Vols. 26-28, pp. 429-432, 2007
- [3] ŽÍDEK, Milan a František KUŘE. *Válcování*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1983.
- [4] SCHINDLER, Ivo, Stanislav RUSZ a Tomáš KUBINA. *Válcování: Studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2014.
- [5] Technická zpráva, *Návrh nové technologie válcování kroužků*, Brück, 26s. 2017.
- [6] WANG, C. et al. "Influence of ring growth rate on damage development in hot ring rolling", Journal of Materials Processing Technology, ISSN: 0924-0136, Vol: 227, Page: 268-280, 2016
- [7] *Deformace: Wikipedie Otevřená encyklopedie* [online]. 2008 [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Deformace>
- [8] FABÍK, Richard. *Tváření kovů: učební text : studijní materiály pro studijní program Metalurgické inženýrství Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2572-4.
- [9] POKORNÝ, Arnošt. *Hutní tvářecí stroje: Válcovací zařízení a pohony*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1987.
- [10] ČADA, Radek. *Technologie I: zákony plastické deformace kovů, dělení materiálu, slévání*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1274-8
- [11] KLÍBER, Jiří. *Plasticita materiálů*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2016
- [12] SCHINDLER, Ivo a Petr KAWULOK. *Deformační chování materiálů: Studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2013. ISBN 978-80-248-3361-3.
- [13] ČADA, Radek. *Technologie tváření a slévání*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN 978-80-248-2273-0.
- [14] KLÍBER, Jiří. *Teorie tváření*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2013
- [15] WANG, C. et al. "Influence of Feed Rate on Damage Development in Hot Ring Rolling", Procedia Engineering, ISSN: 1877-7058, Vol: 81, Page: 292-297, 2014
- [16] YEOM, J. T. et al. "Ring-rolling design for a large-scale ring product of Ti-6Al-4V alloy", Journal of Materials Processing Technology, ISSN: 0924-0136, Vol: 187, Page: 747-751, 2007
- [17] ZAPLETALOVÁ, Martina. *Výroba bežešvých kruhů technologií radiálně-axiálního válcování*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

- [18] KOLLEROVÁ, Mária. *Valcovanie: Vysokošk. učeb. pre skupinu štud. odb. hutníctvo*. Bratislava: Alfa, 1991. ISBN 8005007299.
- [19] KUBINA, Tomáš. *Kalibrace: Studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012.
- [20] Kovárenství: *Investice do válcoven kroužků*. Brno: Svaz kováren ČR, 2017, **Říjen**(62). ISSN 1213-9289.
- [21] Kovárenství: *Novinky při výrobě tvarových rozválcovaných kruhů ve společnosti Triangolo Hulín*. Brno: Svaz kováren ČR, 2016, **Listopad**(58).
- [22] Kovárenství: *Technologie výroby volných výkovků kroužků*. Brno: Svaz kováren ČR, 2017, **Květen**(60).
- [23] Fotogalerie kovárny, výroby výkovků a zpracování oceli. *Triangolo kovárna Hulín* [online]. [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <http://www.triangolo.cz/galerie.html>
- [24] HAŠEK, Vladimír. *Kování*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1965.
- [25] GREGER, Miroslav. *Kování*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008.
- [26] ŽÍDEK, Milan. *Metalurgická tvařitelnost ocelí za tepla a za studena*. Praha 4: Aleko, 1995. 356 s. ISBN 80-85341-45-X.
- [27] BERTI, G., MONTI, M. „Design of a flanged ring produced by hot forming using FE analysis“ International Journal of Materials Engineering and Technology, No. 7, pp. 1-15. 2011.